

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL



## **Desenvolvimento de um Modelo de Otimização para Planeamento de Rotas de Companhias Aéreas**

Hugo Filipe Martins Oliveira

**Mestrado em Estatística e Investigação Operacional**  
Especialização em Investigação Operacional

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor Pedro Martins Pereira Serrão de Moura

2017



# RESUMO

Dados um conjunto de fluxos de tráfego potenciais, uma lista de aeroportos e uma frota à disposição de uma companhia aérea, o problema de desenho de redes na variante de companhias aéreas com estruturas *Hub-and-spoke*, consiste em determinar uma rede aérea composta por um conjunto de voos, respetivos horários e tipo de avião afetos a cada rota, considerando três critérios, nomeadamente, o potencial de passageiros, a conectividade da rede e a produtividade da frota.

A complexidade do problema, enquadra-o no tipo de problemas NP-difícil, sendo que até ao momento não são conhecidos modelos de otimização que abordem o problema na sua globalidade. Assim, o método de resolução encontrado pelas companhias aéreas, passa pela divisão do problema em subproblemas de menor dimensão resolvidos sequencialmente.

Nesta dissertação é proposto o estudo do problema de desenho de redes, recorrendo a técnicas heurísticas que pertencem ao conjunto de algoritmos evolutivos, mais concretamente, a utilização de um algoritmo genético.

Tendo presente a determinação de uma rede aérea como principal objetivo do trabalho, pretende-se ainda avaliar o número e localização de *Hub's* que garante melhores resultados para a rede. Assim, apresenta-se um caso de estudo composto por um conjunto de vinte e três aeroportos, dos quais três são considerados potenciais *Hub's* e uma frota de quinze aviões divididos em três tipos diferentes de equipamentos.

Considerando as estimativas de fluxos de tráfego diários médios nas diversas origens-destino (*O&D*) e o peso de cada ponto de vendas (*POS*), será inicialmente proposto um método de estimação da procura que permita dividir a estimativa de procura por períodos de tempo ao longo do dia (*slots*), em intervalos de quinze minutos, desde a hora de abertura até à hora de fecho de cada aeroporto, sendo essa estimativa posteriormente usada para identificar o potencial de passageiros para as várias combinações de horários das diversas origens-destino (*O&D*).

De modo a avaliar a localização e número de *Hub's* ideais para a rede, propõe-se correr o algoritmo genético em paralelo para o conjunto de diferentes combinações de localizações e número de *Hub's* escolhidos, comparando os resultados das melhores soluções de cada um e consequentemente, escolhendo a solução de rede que maximize os critérios definidos.

**Palavras Chave:** Aviação comercial; Rede aérea; desenho de redes; otimização; Algoritmo genético;



# ABSTRACT

Given a set of potential traffic flows, a list of airports and a fleet, the network design problem for *Hub-and-spoke* carriers, consists in determining a network of scheduled flights and fleet type assignment in each route. The network performance measurement should be evaluated according to three objectives, namely, potential traffic flows, network connectivity and fleet productivity.

This problem is characterized by numerous complexities. Based in computational complexity theory it is classified as NP-hard problem. So far no single optimization model has been formulated. Thus, airlines decided to decompose the overall problem into a set of subproblems solved in order.

In this thesis it will be proposed the study of the overall network design problem using heuristic methods, considering a specific subset of evolutionary optimization algorithms, namely a genetic algorithm will be used.

Bearing in mind the study's main objective to design a network, it is intended to further evaluate the number and location of *Hub*'s that have the best results for the network. Thus, it will be presented a case study consisting in a set of twenty-three airports, three of which are considered potential *hub* locations and a fleet of fifteen aircrafts composed by three different aircraft types.

Considering the estimated average daily traffic flows in the different origin-destination (*O&D*) and the relative point of sale (*POS*) weights, it will be initially proposed a method to split the expected demand into fifteen minutes interval slots, between opening and closure hours. The estimated demand by *O&D* / *slot* will then be used to identify potential demand for all possible flows.

In order to evaluate the optimal number and location of *Hub*'s, it will be proposed to run parallel algorithms for a subset of selected *Hub* possibilities. The results will be compared and the solution with the higher value will be selected as the best option.

**Keywords:** Commercial Aviation; Airline Network; Network Design; Optimization; Genetic algorithm;



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e complexidade do negócio	1
1.2	Conceitos de aviação	2
1.3	O que é uma Rede aérea?	5
1.3.1	Estruturas de Rede	5
1.3.2	Métricas de avaliação de uma rede aérea	7
1.3.3	Métodos de Resolução	10
1.4	Objetivo da dissertação	13
<b>2</b>	<b>Definição do Problema</b>	<b>15</b>
2.1	Descrição do Problema	15
2.1.1	estrutura de rede	15
2.1.2	estrutura de bank	16
2.1.3	Planeamento de Rotas	17
2.1.4	Planeamento de Horários	18
2.2	Critério de avaliação da rede	19
2.2.1	Potencial de passageiros	20
2.2.2	conectividade de rede	20
2.2.3	Produtividade da frota	21
2.3	Descrição do Caso de Estudo	21
2.3.1	Aeroportos	21
2.3.2	Matriz de tempos de voo	21
2.3.3	Frota	23
2.3.4	Potencial de Procura	24
<b>3</b>	<b>Preferência de passageiros</b>	<b>25</b>
3.1	Metodologia	25
3.1.1	Modelar Horário de Partida	25
3.1.2	Modelar Horário de Chegada	26
3.1.3	Preferência horária agregada	28
3.2	Tipo de serviço	29
3.3	Adicional de Procura	30
3.4	Aplicação ao caso de estudo	31
3.4.1	Gerar Itinerários Direcionais	31
3.4.2	Modelar procura por horário de chegada e partida	31
3.4.3	Determinar pares de slots	31
<b>4</b>	<b>Algoritmo Genético</b>	<b>33</b>
4.1	Método	34
4.2	Codificação	35
4.2.1	Gene	35

4.2.2	Cromossoma . . . . .	37
4.3	População . . . . .	39
4.3.1	População Inicial . . . . .	39
4.3.2	Novas Gerações . . . . .	39
4.4	Função Aptidão . . . . .	40
4.4.1	Crêterios de avaliação da rede . . . . .	40
4.4.2	Processo de avaliação . . . . .	41
4.5	Operadores Genéticos . . . . .	42
4.5.1	Seleção e Reprodução . . . . .	42
4.5.2	Cruzamento . . . . .	43
4.5.3	Mutação . . . . .	45
4.6	Cr�terio de Paragem . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Aplicação ao caso de estudo</b>	<b>47</b>
5.1	Resultados Computacionais . . . . .	47
5.1.1	Cenário 1 . . . . .	47
5.1.2	Cenário 2 . . . . .	48
5.1.3	Cenário 3 . . . . .	49
5.1.4	Cenário 4 . . . . .	49
5.1.5	Cenário 5 . . . . .	51
5.1.6	Cenário 6 . . . . .	51
5.1.7	Cenário 7 . . . . .	53
5.2	Escolha da melhor Solução . . . . .	54
5.3	Conclusões . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>59</b>
	<b>Lista de Figuras</b>	<b>61</b>
	<b>Lista de Tabelas</b>	<b>63</b>
	<b>Glossário</b>	<b>65</b>



# Capítulo 1

## Introdução

A presente dissertação propõe-se estudar o problema de desenho de redes no contexto das companhias aéreas com estruturas *Hub-and-Spoke*. O trabalho pretende abordar o problema integral, recorrendo a uma heurística evolutiva, mais especificamente, um algoritmo genético que permita ajudar no suporte à decisão sobre duas questões recorrentes para as companhias aéreas. Considerando um conjunto de aeroportos potenciais e frota à disposição da companhia aérea, qual o número de hub's e respetivas localizações que garantem melhores resultados para a rede? e qual o planeamento de rotas que apresenta melhores resultados para o problema de maximização do número de passageiros potenciais, conectividade da rede e produtividade da frota?

Este capítulo encontra-se dividido em três secções principais. Na primeira secção será feito um enquadramento do setor de atividade e respetiva complexidade do negócio da aviação comercial. Considerando a elevada especificidade do problema, na segunda secção serão introduzidos alguns conceitos e termos utilizados, com destaque para as métricas que permitem avaliar a rentabilidade e performance das companhias aéreas. A terceira secção consistirá na definição de rede aérea e descrição das principais estruturas de rede utilizadas pelas companhias aéreas.

Nos capítulos subsequentes irão ser descritos detalhadamente os aspetos anteriormente mencionados. No segundo capítulo será feita uma definição do problema, onde serão descritos os diversos subproblemas que compõem o problema de desenho de redes, os critérios de avaliação propostos e por fim será apresentado um caso de estudo. No terceiro capítulo será proposto uma metodologia de modelação da procura em função da preferência horária dos passageiros que servirá como input para o processo de otimização. O quarto capítulo apresentará o algoritmo genético, desagregado nas diversas componentes, sendo descrito o procedimento heurístico proposto e respetiva abordagem nas suas diferentes fases e a aplicação ao caso de estudo. No quinto capítulo serão apresentados os resultados computacionais da aplicação do algoritmo genético ao caso de estudo. Por fim, no sexto capítulo apresentam-se as conclusões finais da dissertação.

### 1.1 Enquadramento e complexidade do negócio

Apesar do elevado contributo para o desenvolvimento económico mundial e do enorme volume de negócios que o setor de atividade tem conseguido gerar ao longo dos anos, o negócio da aviação comercial de passageiros caracteriza-se pelos elevados rácios  $\frac{\text{Endividamento}}{\text{Capital}}$  e margens de lucro tipicamente baixas. Esta situação acontece sobretudo devido a dois fatores. O primeiro diz respeito à elevada necessidade de capital que o negócio do transporte aéreo exige, mais concretamente, devido aos investimentos em compras ou leasing de aviões e ao enorme peso do combustível nos custos operacionais das companhias aéreas. O segundo fator está relacionado com a extrema sensibilidade a ciclos económicos, especialmente no que respeita ao segmento de procura por viagens de lazer.

Apesar dos esforços das companhias aéreas em tentar diferenciar os seus serviços face aos concorrentes, seja através da qualidade das refeições, atendimento, tipos de entretenimento entre outros tipos de benefícios, a verdade é que devido ao nível de construção, quando comparamos aviões do mesmo porte em termos de velocidade, conforto ou segurança, os aviões são tendencialmente semelhantes entre as diversas companhias aéreas. Apesar de todos os esforços por parte das companhias aéreas, provavelmente os principais critérios de escolha são o preço e os horários de partida e chegada mais convenientes para os passageiros.

O setor da aviação comercial caracteriza-se ainda por ser extremamente competitivo. As companhias aéreas têm relativa facilidade em abrir novas rotas e dessa forma expandir serviços para novos mercados. Mesmo em termos de criação de novas companhias aéreas, não existem grandes barreiras à entrada de novos concorrentes, apesar das elevadas exigências de capital e dispendiosos custos operacionais já mencionadas. O ambiente concorrencial proporcionado pelas companhias aéreas é extremamente agressivo, já que a sua tendência natural é motivada em grande medida pela tentativa de eliminar a concorrência. A combinação de fatores concorrenciais resulta, em alguns mercados, em situações de oligopólio ou até monopólio.

Considerando todas as características e adversidades que o setor de atividade onde as companhias aéreas estão inseridas oferece, para manterem resultados líquidos positivos, as companhias aéreas têm de ser eficientes e oferecer um produto competitivo. Este tipo de decisões são tomadas durante o processo de planeamento estratégico, tornando-o no principal fator de sucesso para uma companhia aérea.

## 1.2 Conceitos de aviação

A procura é o principal dinamizador do setor da aviação. Nesse sentido é fundamental para as companhias aéreas conhecerem os diversos aspetos que compõem a procura de passageiros. Um dos aspetos diz respeito à intenção de um passageiro viajar entre dois pontos, independentemente do percurso e companhia aérea escolhidos. Na perspetiva da aviação comercial, esta ação designa-se por *procura entre determinada Origem-Destino (O&D)*.

Outra componente importante da procura tem a ver com o conhecimento sobre o Ponto de Venda do Bilhete, ou em inglês *Point of Sale POS*.

Considerando as diferenças cambiais e diferentes capacidades de poder de compra entre mercados, por vezes, as companhias aéreas determinam preços diferentes para a mesma viagem, consoante o **POS**. Tipicamente a venda está associada a um mercado próximo do ponto de origem da viagem, no entanto, com a revolução digital e o consequente aumento de vendas pela internet, os motores de busca passaram naturalmente a pesquisar os preços nos diversos **POS**, apresentando o valor mais baixo encontrado para determinado **O&D** oferecido por uma companhia aérea. Esta situação originou perdas consideráveis de receita, levando as companhias aéreas a criar uma nova lógica de contabilizar e publicar preços, designada por Ponto de início da viagem, ou em inglês, *Point of Commencement POC*. Atualmente ambas as lógicas de vendas são utilizadas, cabendo a cada companhia aérea a decisão de determinar qual é mais conveniente.

Por fim, é ainda importante conhecer a direcionalidade da procura, sendo que o itinerário **Outbound** representa o sentido do percurso que o passageiro vai fazer na sua viagem de ida e o itinerário **Inbound** o percurso de regresso.

O objetivo de qualquer companhia aérea é adicionar serviços em mercados que tragam grande contributo para a sua rede de voos. O processo de planeamento é definido a grande distância, sendo o método de estimação da procura potencial dos **O&D / POS**, ou através da combinação entre a Paridade de Poder de

Compra **PPC** e o conceito de **Catchment area**, que mede a área de influência dos aeroportos, determinando o número de pessoas que vivem num raio de 100-200km ou que conseguem chegar aos aeroportos no período de 1-2 horas por carro ou comboio. Quanto maior for o **Catchment area** e **PPC**, maior será a dimensão do mercado e consequentemente maior o interesse das companhias em oferecer serviços. Na figura 1.1 encontra-se ilustrado um exemplo de viagem entre os aeroportos **ES1** e **OE2** que resume as terminologias apresentadas.

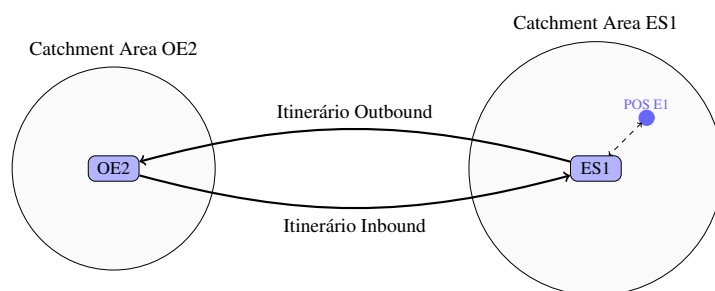


Figura 1.1: Exemplo POS: E1 / O&D: ES1-OE2. Passageiros que compra uma viagem de ida e volta em E1 para viajar entre o aeroporto de origem ES1 e o aeroporto de destino OE2, com regresso no itinerário inverso

Após a avaliação da dimensão do mercado, as companhias aéreas devem desenhar a sua oferta de modo a maximizar a receita potencial, utilizando eficientemente os recursos disponíveis. Com o propósito de conhecer as terminologias referentes à oferta, serão apresentados de seguida os principais conceitos da oferta. Um **Leg** é composto por uma descolagem e uma aterragem de um avião. De modo a diferenciar cada serviço de uma companhia aérea, a cada **Voo** é atribuída uma identificação única designada por **Numero de voo**. Este corresponde à combinação entre o código da companhia aérea e um determinado número designado. Assim, um **Voo** é composto por um ou mais legs operados consecutivamente por um avião com número de voo único. O agrupamento de voos efetuados entre uma determinada origem e um determinado destino designa-se por **Rota**.

Um **Itinerário** representa um percurso que uma companhia aérea disponibiliza aos passageiros para ligar um determinado **O&D**. Utilizando com o exemplo do **O&D** ES1-OE2 apresentado na figura 1.1, as companhias aéreas têm à sua disposição um conjunto de diferentes tipos de operações de voos, que lhes permitem oferecer diferentes serviços. A figura 1.2 ilustra os tipos de operação e serviços mais comuns. Na figura 1.2a está representado o tipo de itinerário designado por **Nonstop** ou **Unileg**. Este tipo de serviço liga dois aeroportos através de um voo sem paragem intermédia, garantindo o menor tempo de viagem total entre os vários tipos de serviços possíveis.

Uma forma alternativa de servir o **O&D** ES1-OE2 é através da combinação de dois voos operados pela mesma companhia aérea. Na figura 1.2b encontra-se representado o serviço designado por voo de **Ligação**. Este tipo de itinerário é composto por dois voos que fazem ligação no aeroporto **CT1**, planeados de forma sequencial, com a hora de partida do segundo voo (CC203) planeada para uma hora posterior à chegada do primeiro voo (CC701) e, garantindo uma margem de tempo de ligação entre voos que permita proceder à transferência de passageiros e bagagens. Os tempos mínimos de ligação, em inglês Minimum Connecting Time **MCT** representam o tempo mínimo necessário garantido pelo aeroporto para fazer a ligação de passageiros e bagagens entre voos. Quanto mais curto for o **MCT**, maior a eficiência do aeroporto. Apesar de não existir nenhum limite máximo de ligação, tipicamente as companhias aéreas avaliam para cada **O&D** os tempos de ligação oferecidos pela concorrência para determinar o tempo máximo de ligação, ou em inglês Maximum Connecting Time **MaxCT** que garanta a competitividade do itinerário. Um **Hit** ou ligação competitiva e admissível, verifica-se quando os horários de ambos os voos estão planeados de forma a que a diferença horária entre a chegada do primeiro voo e partida do segundo, se encontra entre o **MCT** e **MaxCT**.

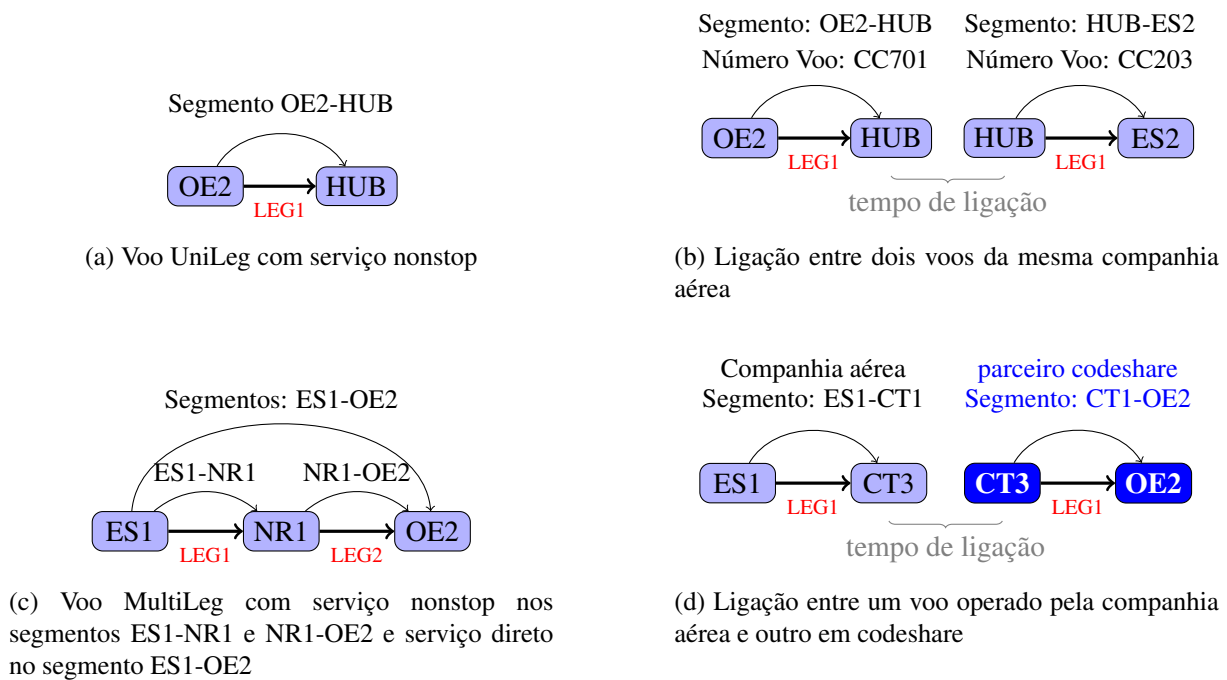


Figura 1.2: Diferentes formas de serviços prestados pelas companhias aéreas que resultam em diferentes tipos de itinerários à disposição dos passageiros

Outro tipo de **Itinerário** possível para servir um determinado **O&D** é disponibilizado através de um voo **MultiLeg**, tal como exemplificado na figura 1.2c. Esse tipo de operação caracteriza-se por oferecer vários voos sequenciais através de um único número de voo. A escala feita em **NR1** serve para desembarcar os passageiros com destino a **NR1** e correspondentes bagagens, limpar o avião, reabastecer, embarcar os passageiros com origem **NR1** e respetivas bagagens. Todo este processo é feito enquanto os passageiros do **O&D** ES1-OE2 permanecem dentro do avião. Este tipo de voo permite à companhia aérea disponibilizar serviços para três segmentos através de um único número de voo constituído por dois legs. A designação do tipo de serviço para os passageiros que efetuam o segmento mais longo designa-se por serviço **Direto**. Tipicamente as companhias aéreas utilizam este tipo de voos quando pretendem oferecer serviços num **O&D** que tenha uma duração de viagem superior à autonomia do avião utilizado, obrigando a uma paragem técnica intermédia, ou quando o potencial de mercado dos **O&D** é pequeno para oferecer serviço **Nonstop**, tornando-se apenas viável através da comercialização de voo combinado. Comparando com os outros tipos de itinerários apresentados anteriormente, o **O&D** ES1-OE2 servido através de um voo **MultiLeg** apresenta tempo total de viagem superior à de um serviço **Unileg**. Tipicamente o tempo total de viagem é inferior aos voos do tipo **Ligação**, apresentando também vantagens em termos de comodidade, já que os passageiros não necessitam de trocar de avião.

Por último, na figura 1.2d apresenta-se um tipo de serviços que é em tudo semelhante ao serviço de **Ligação**, no entanto, neste caso o **O&D** é servido através de um itinerário constituído por um voo **Codeshare**. Este tipo de acordos permite que um determinado voo que é operado por uma companhia aérea, seja vendido através de um número de voo de outra companhia aérea, dando a perceção aos passageiros que o voo será operado pela segunda companhia aérea. Este tipo de acordos beneficia ambas as companhias aéreas, permitindo ampliar a rede de voos sem necessidade de efetuar mais voos. A companhia aérea operadora beneficia de uma maior taxa de ocupação dos seus voos e menos esforço de vendas, enquanto que a outra companhia aérea, ganha uma comissão de venda do segmento não operado.

### 1.3 O que é uma Rede aérea?

Uma **Rede Aérea** é formada pelo conjunto de aeroportos servidos de forma direta pela companhia aérea ou indiretamente através dos seus parceiros ao mercado. A conectividade de uma rede é um dos fatores mais importantes no desenho de uma rede, no entanto, devido à componente temporal, as ligações entre as várias rotas que compõem a rede variam ao longo do dia.

#### 1.3.1 Estruturas de Rede

Em termos de **estrutura de rede**, a **Cobertura** está relacionada com o conjunto de aeroportos que são servidos pela companhia aérea, enquanto que a **Densidade** diz respeito ao número de voos que compõem cada rota. Quanto maior a cobertura e densidade da rede, maior a qualidade do produto da companhia aérea.

A construção da oferta de uma companhia aérea efetua-se durante o processo de planeamento estratégico. A primeira decisão que a companhia aérea tem de tomar está relacionada com o tipo de estrutura de rede que pretende adotar. As estruturas mais comuns são o **Hub-and-Spoke** e o **Ponto a ponto**, que seguem diferentes critérios para definição das rotas a operar. Na figura 1.3 podemos observar um esquema de rede que ilustra a diferença entre ambas as estruturas.

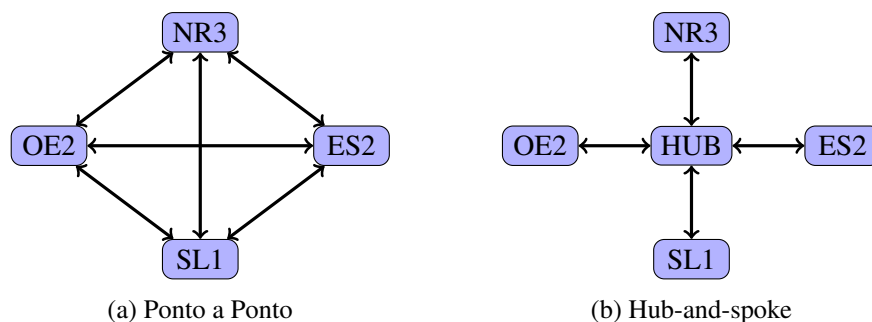


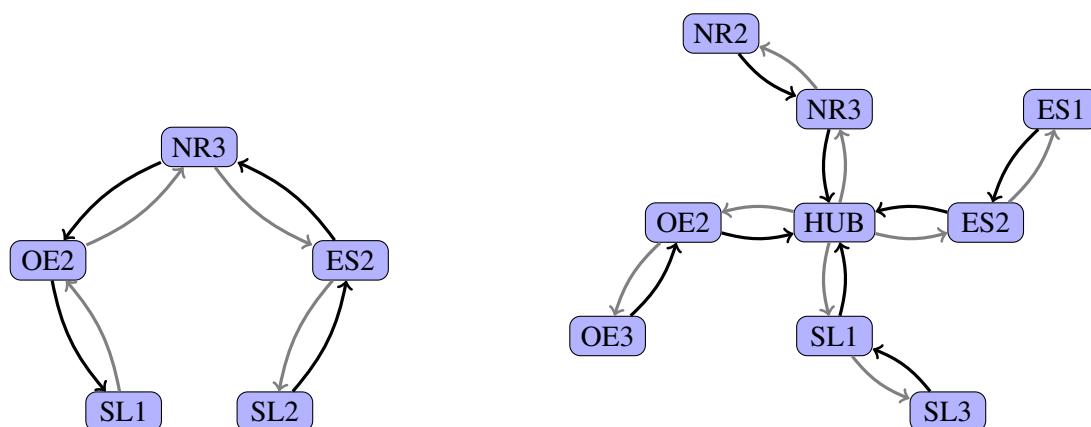
Figura 1.3: Tipos de estrutura de rede mais comuns

O tipo de estrutura Ponto a ponto desenha a sua rede unicamente através de serviços **Nonstop** (figura 1.2a), avaliando o potencial de mercado de cada **O&D** individualmente, não se preocupando com a conectividade da sua rede. As estruturas Ponto a ponto apresentam a configuração esquematizada na figura 1.3a. De entre o conjunto de itinerários possíveis, o **Nonstop** garante um menor tempo total de viagem aos passageiros, sendo nesse sentido o mais apelativo para os passageiros. O foco principal neste tipo de estrutura é a taxa de utilização da frota. Para garantir maior eficiência, os tempos de inatividade dos aviões são reduzidos ao mínimo, implicando para isso a oferta de voos em períodos do dia de menor procura. Em consequência do foco na eficiência e desconsideração da conectividade, o tipo de estrutura apresenta ainda melhores resultados em termos de pontualidade.

A estrutura *Hub-and-spoke* (figura 1.3b) consiste em pelo menos um aeroporto designado por **Hub** que tem como função "receber e distribuir" o fluxo de passageiros entre os diferentes voos. Neste tipo de estruturas, os **O&D** que não têm origem ou destino no aeroporto **Hub**, são servidos pelo tipo de **Itinerário Ligação** (ver figura 1.2b), resultando num maior tempo total de viagem para os passageiros. Este tipo de estruturas permite servir mais **O&D** com menos aviões, sendo a conectividade o fator que permite ganhar economias de escala. Para conectar os **O&D** de forma eficiente, os voos de **Inbound** - chegada ao **Hub** - e **Outbound** - partida do **Hub** - são programados na lógica de **Banks**, que representa uma concentração de voos de chegada ou saída no mesmo período de tempo, num determinado aeroporto, tendo como propósito o aumento da conectividade entre voos.

No trabalho de (Cook and Goodwin, 2008) é apresentada a evolução histórica das estruturas *Hub-and-Spoke* e Ponto a ponto, sendo posteriormente feita uma comparação entre ambas para um conjunto de atributos. Por fim, é abordada a convergência de estruturas que se tem verificado no setor da aviação comercial, levando ao surgimento de um modelo de rede misto.

Além das duas estruturas mais comuns já abordadas, existem outros tipos de configurações de redes baseados em voos do tipo *Multileg* (ver figura 1.2c). Apesar de menos frequentes, pode-se observar na figura 1.4 dois esquemas de rede que ilustram as diferenças entre ambas as estruturas. No caso da estrutura **Tour**, representada na figura 1.4a é programado um único voo *Multileg* que percorre todos os aeroportos em que a companhia oferece serviços. Neste tipo de estrutura a operação é feita numa lógica de circuito sem recorrer a um *Hub*, enquanto a estrutura **Subtour**, representada na figura 1.4b, é constituída também por voos *Multileg*, mas utiliza um aeroporto como HUB.



(a) Desenho de rede baseado numa estrutura tour

(b) Desenho de rede baseado numa estrutura subtour

Figura 1.4: Outros tipos de estruturas de rede

No trabalho de (Lederer and Nambimadom, 1998) foram estudados os quatro tipos de estruturas apresentados anteriormente, com o intuito de compreender as razões que levam as companhias aéreas a escolher cada tipo de estrutura e como essas escolhas influenciam os dois tipos de custos definidos. Os **custos de companhia aérea**, representam os custos operacionais associados a operar a rede de voos selecionada, enquanto os **custos de passageiros** estão associados à qualidade de serviço na ótica dos passageiros, considerando três fatores na sua determinação. O primeiro diz respeito à soma dos tempos de viagem, o segundo às diferenças entre preferência horária e hora efetiva de viagem e o terceiro, aos atrasos nas chegadas. Posteriormente considera-se que o objetivo de qualquer companhia aérea é desenhar a sua rede de forma a minimizar a soma dos custos da companhia aérea e de passageiros.

O método usado para avaliar as estruturas de rede consiste na criação de um modelo paramétrico que simula diferentes condições de mercado, em função de fatores tais como, distância entre aeroportos, potencial de passageiros e o número de aeroportos servidos, sendo de assinalar que mediante determinadas condições específicas, qualquer tipo de estrutura de rede pode ser ótima. É ainda de salientar que entre os dois tipos de estrutura mais frequentes, a estrutura **Ponto a ponto** apresenta melhores resultados quando a distância entre cidades é curta, os níveis de procura são muito elevados ou o número de cidades servidas é baixo. Apesar de dar mais garantias de pontualidade, esta estrutura gera redes com baixa *Densidade* de voos por rota. Por sua vez, a estrutura **HUB-and-Spoke** apresenta melhores resultados quando, a distância entre cidades é grande, os níveis de procura são intermédios, ou número de cidades servidas é grande. Este tipo de estrutura permite criar redes com grande *Densidade* de voos em algumas rotas, no entanto apresenta piores resultados em termos de pontualidade.

O desenho de rede tem um papel fundamental na maximização da receita potencial de uma companhia

aérea. Em algumas situações, as características de mercado requerem desenhos de rede um pouco mais flexíveis. Nesse sentido, algumas companhias aéreas desenharam as suas redes recorrendo ao **modelo de rede misto**. Este tipo de estrutura caracteriza-se por combinar partes de estruturas num único modelo de desenho de rede. Consoante as exigências e composição do mercado, as companhias aéreas que utilizam o modelo misto, combinam pelo menos características de dois tipos de estruturas no seu desenho de rede. Na figura 1.5 encontra-se representado um exemplo de modelo de rede misto que incorpora lógicas de definição de rotas provenientes dos quatro modelos apresentados anteriormente. A parte central da rede está desenhada por voos **Nonstop** ligados através de um HUB, seguindo a lógica de estrutura *Hub-and-Spoke*. A oferta para os aeroportos a este, é desenhada seguindo uma lógica de estrutura *Subtour*, utilizando voos **Multileg** com recurso a um HUB. O desenho na parte centro sul tem um conjunto de aeroportos servidos entre si por voos **Nonstop** de forma direta, tal como acontece nas estruturas *Ponto a ponto*. Por fim, uma parte da rede que serve os aeroportos a centro oeste estão desenhadas segundo a lógica característica das estruturas *Tour*.

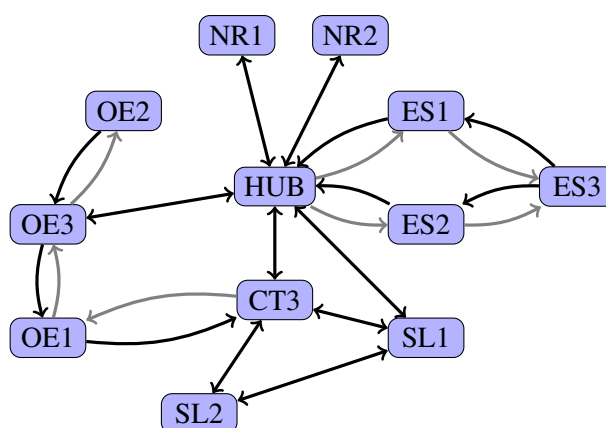


Figura 1.5: Exemplo de modelo de rede misto, combinando as quatro tipos de estruturas

Os modelos mistos não pressupõem que sejam utilizados todos os tipos de estruturas. Em (Cheng-Lung, 2010), após a apresentação das vantagens dos dois tipos de estruturas mais comuns, faz-se uma síntese de um **modelo de rede misto** composto por partes de ambas as estruturas mais comuns. De um modo geral, neste tipo de modelo e rede, a intensidade de voos no HUB não é tão elevada como a estrutura *Hub-and-Spoke*, no entanto o foco continua a ser a conectividade através da identificação de oportunidades de conexão entre mercados específicos, em que os voos de **Inbound** e **Outbound** apresentam elevada sincronização, com fluxos de tráfego direcionais.

As companhias aéreas que optam por uma estrutura de rede com **Hub** necessitam de determinar o número ótimo e respetiva localização do(s) HUB(s). No trabalho de (Yu and Yang, 1998) é proposta uma heurística para o problema de estrutura de rede e localização de HUB's. Comparativamente com outros trabalhos, este tem a particularidade de não assumir à partida o número de HUB's, nem as suas localizações. Após simular uma grande variedade de parâmetros da procura, conclui-se que, dado um conjunto de cidades e correspondentes posições geográficas relativas, o principal fator que determina a escolha dos HUB(s) é a localização geográfica. Nesse sentido é bastante provável que alguns aeroportos se mantenham como bons candidatos a HUB, independentemente do nível de procura dos O&D.

### 1.3.2 Métricas de avaliação de uma rede aérea

O desenho de rede ótimo é aquele que permite maximizar a rentabilidade potencial de uma companhia aérea. Considerando a elevada dimensão e complexidade da maioria das redes, a avaliação da rentabilidade e performance pressupõem o conhecimento de um conjunto de métricas e terminologias



presentes em (Belobaba, 2006a).

As duas métricas que servem de base à avaliação da rentabilidade das companhias aéreas são relacionadas com a distância percorrida em cada rota. A primeira métrica base, o **Available Seat Kilometer (ASK)** representa um lugar disponível por quilometro percorrido:

$$\text{ASK} = \text{Capacidade} \times \text{Distância} \quad (1.1)$$

A segunda métrica base, o **Revenue Passenger Kilometer (RPK)**, reflete o número de lugares disponíveis efetivamente vendidos e representa um passageiro transportado por quilometro percorrido:

$$\text{RPK} = \text{Passageiros} \times \text{Distância} \quad (1.2)$$

Através da relação das duas métricas base, determina-se a taxa de ocupação média da rede, que se designa por **Load Factor (LF)**. Esta mede a percentagem de lugares disponíveis que foram vendidos durante um determinado período:

$$\text{LF} = \frac{\text{RPK}}{\text{ASK}} \quad (1.3)$$

O **Yield** é a métrica que representa a tarifa média por passageiro em cada voo. Mede o valor pago pelos passageiros por quilometro percorrido. Tipicamente é apresentada em centimos por quilometro e é uma medida útil para avaliar mudanças tarifárias ao longo do tempo:

$$\text{Yield} = \frac{\text{Receita}}{\text{RPK}} \quad (1.4)$$

Do produto entre o **LF** (Quantidade) e **Yield** (Preço), resulta o **Revenue per ASK (RASK)**. Este representa a receita por unidade de output, medido em centimos por **ASK**:

$$\text{RASK} = \frac{\text{Receita}}{\text{ASK}} \quad (1.5)$$

A métrica **Cost per ASK (CASK)** representa o custos operacionais por unidade de output, medido em centimos por **ASK**:

$$\text{CASK} = \frac{\text{Custos}}{\text{ASK}} \quad (1.6)$$

O objetivo das companhias aéreas é a maximização da margem de lucro, que resulta do confronto entre **RASK** e **CASK**:

$$\text{Margem de Lucro} = \text{RASK} - \text{CASK} \quad (1.7)$$

No trabalho de (Baldanza, 2002) encontra-se detalhado o processo de avaliação da rentabilidade de uma rede aérea. As rubricas contabilísticas de receita e custos necessitam de ser ajustadas para avaliar a rentabilidade da rede e medir a contribuição de cada parte da rede para o lucro da companhia aérea. Segundo o autor, as companhias aéreas consideram como ponto de partida do processo de planeamento



estratégico, o desenho de rede do ano anterior e a respetiva rentabilidade observada. Assim, o processo de decisão é determinado através do confronto da estimativa de rentabilidade do novo desenho de rede em comparação com o do ano anterior. Tendo em conta que o setor da aviação comercial se caracteriza por muita incerteza na procura e, sendo o processo de planeamento estratégico determinado com muita antecedência, a margem de erro da previsão de rentabilidade é muito elevada, fazendo com que esta métrica seja sobretudo usada para monitorização do desempenho de curto prazo.

Em alternativa às métricas de rentabilidade, apresentam-se em seguida métricas de performance da rede, nomeadamente, Robustez Operacional, Produtividade da Frota e Conectividade do(s) HUB(s).

A **Robustez e Fiabilidade Operacional** está relacionada com a pontualidade dos voos e resistência a situações de irregularidades operacionais. Para reduzir a probabilidade de propagação de atrasos para os voos seguintes, as companhias aéreas introduzem no sequenciamento de tarefas, **Buffer Times**, que correspondem a tempo adicional que permite prevenir irregularidades operacionais.

No trabalho de (Wu, 2006) foi desenvolvido um algoritmo de otimização sequencial para melhorar a robustez e fiabilidade operacional da rede através da otimização dos **Buffer Times**. Apesar de ser um problema bastante estudado, este trabalho tem a vantagem de avaliar o efeito de propagação dos atrasos nos voos, considerando o sequenciamento de tarefas como um processo único. É desenvolvido um modelo estocástico de simulação de irregularidades, utilizando técnicas de Monte Carlo que geram situações aleatórias de acordo com dados históricos, por forma a avaliar a probabilidade de propagação de atrasos.

A **Produtividade da Frota** está diretamente relacionada com a utilização que cada companhia aérea faz da sua frota. Quanto maior a taxa de utilização dos aviões, maior a probabilidade da companhia gerar receita.

O tempo compreendido entre chegar ao **Gate (On Blocks)** e sair de novo do **Gate (Off Blocks)**, designa-se por **Turnaround Time (TAT)**. Durante esse período o avião necessita de desembarcar passageiros e bagagens, reabastecer, limpar, embarcar passageiros e bagagens. No HUB, o **TAT** também inclui trabalhos de manutenção, o que torna o processo mais lento em comparação com o **TAT** efetuado fora do HUB. Os **TAT** são normalmente específicos por avião, aeroporto, companhia aérea e rotação. Tipicamente os aviões mais pequenos requerem menos tempo que os grandes aviões (Goedeking, 2010).

De acordo com (Belobaba, 2006d) existem duas medidas para avaliar a produtividade da frota. A primeira designa-se por **Utilização de avião** e mede o número médio de horas que cada avião está a voar em cada período de 24 horas. A segunda medida designa-se por **Produtividade de avião** e avalia a forma como os aviões são utilizados, incorporando a distância percorrida e o número médio de lugares oferecidos. Nesta dissertação irá ser considerada a **Utilização de avião** como medida de produtividade.

Grande parte do sucesso de uma companhia aérea passa por manter as taxas de utilização elevada. A referência na indústria da aviação para medir o tempo necessário para operar uma rota designa-se por **block-hour (BH)**, considerando como tempo de utilização, o momento entre o fecho da porta do avião na partida, até ao momento que a porta abre na chegada, incluindo o **Taxi Time**, que corresponde ao momento entre a aterragem e o **Gate**, depois do avião aterrar e o momento entre o **Gate** e a pista, antes do avião descolar para o próximo voo.

$$BH = \text{tempo Viagem} + \text{taxi} \quad (1.8)$$

Após calcular o **BH**, a **Utilização de avião** é determinada pela divisão pelo número de aviões utilizados. Tipicamente esta métrica é calculada por tipo de avião.

$$\text{Utilização de Avião} = \frac{BH}{n^{\circ} \text{ de aviões utilizados}} \quad (1.9)$$

Para uma companhia aérea que tenha uma estrutura de rede definida com HUB's, a métrica mais importante para avaliar a rede é a **Conectividade do(s) HUB(s)**. As estruturas de rede fortemente centradas como a *Hub-and-Spoke* devem garantir a satisfação de dois critérios principais. Em primeiro lugar, maximizar o número de ligações admissíveis e comercialmente relevantes (**Hit**), entre voos de chegadas (**Inbound**) e voos de partidas (**Outbound**) num HUB, que permitam criar **Itinerários** competitivos em determinados **O&D**. Em segundo lugar, a minimização do tempo médio dos **Hit** para permitir maior competitividade dos **Itinerários**.

Para satisfazer os dois critérios da conectividade, as companhias aéreas determinam o desenvolvimento da **estrutura de Bank para um HUB** como um dos fatores mais importantes em todo o processo de planeamento estratégico. Segundo (Goedeking, 2010), a forma das companhias aéreas garantirem conectividade é através do planeamento de voos **Inbound** e **Outbound** numa lógica de **Banks**, que significa uma concentração de voos que chegam ou partem num determinado período de tempo. A duração de um *bank* designa-se por **Inbound Bank Duration (BDI)**, no caso dos voos de **Inbound** e por **Outbound Bank Duration (BDO)**, no caso dos voos de **Outbound**.

O tempo de ligação entre voos num determinado aeroporto, varia em função da dimensão, recursos e características do aeroporto e dos tipos de aviões que estão envolvidos na ligação. Cada aeroporto disponibiliza a lista de tempos mínimos **MCT** que garante ser admissível conectar passageiros e bagagens entre voos de ligação. O tempo total de viagem é um dos fatores mais importantes no processo de escolha dos passageiros. Nesse sentido, a competitividade dos **Itinerários** está em grande parte relacionada com o tempo de ligação dos **Hit** no HUB. Normalmente as companhias aéreas definem um limite máximo de ligação para considerar um **Hit** competitivo, (**MaxCT**). Existem duas abordagens para qualificar a conectividade de um **Hit**, uma considera o **MaxCT** fixo e outra flexível. O método **MaxCT** flexível usa como referência o tempo total de viagem mais curto disponível no mercado para um determinado **O&D**, independentemente de ser um voo **Nonstop** ou outro tipo, para determinar o **MaxCT**. Por outro lado o método **MaxCT** fixo define um tempo máximo de ligação igual para cada **O&D**.

### 1.3.3 Métodos de Resolução

Neste setor altamente concorrencial, o principal fator de sucesso é a competitividade. Esta é alcançada pela conjugação de dois fatores, a oferta de um bom produto no mercado e a utilização eficiente dos recursos. Para uma companhia aérea, estas decisões são tomadas no *Processo de Planeamento Estratégico*. Como na maioria dos casos a eficiência de recursos e oferta de um bom produto são conflituosos entre si, o Processo de Planeamento Estratégico tem um papel de extrema importância no sucesso da companhia aérea.

O objetivo do Processo de Planeamento Estratégico é maximizar a rentabilidade das companhias aéreas pela tomada de decisões relacionadas com aviões e tripulação. Este problema coloca grandes desafios, sendo caracterizado pela enorme complexidade. Essa complexidade confere um excelente contexto para a aplicação de técnicas e modelos de Investigação Operacional. Ao longo dos anos a disciplina tem dado um enorme contributo para encontrar métodos e soluções, que têm permitido potenciar o crescimento das companhias aéreas. Ainda assim, até ao momento nenhum modelo de otimização foi resolvido, ou sequer formulado na sua globalidade. Em alternativa, para encontrar boas soluções em tempo útil, as companhias aéreas dividem o problema em subproblemas de menor dimensão que são resolvidos de forma sequencial. Na figura 1.6 está esquematizado um diagrama com a sequencia de subproblemas, que para o efeito desta dissertação se considera que se encontra composto em três partes, nomeadamente, **Planeamento de Frota, Desenho de Redes e Planeamento de Tripulação**.

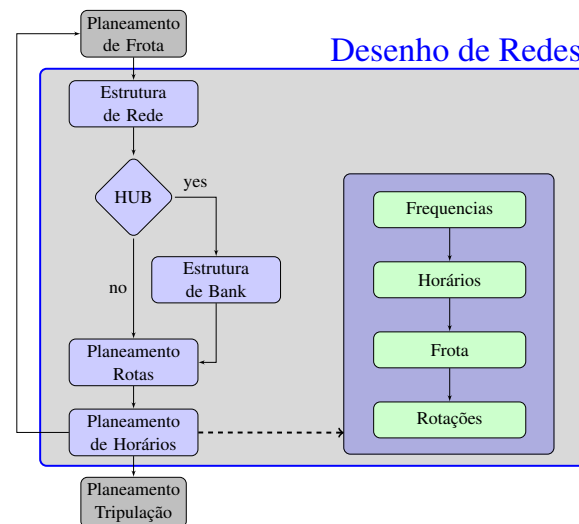


Figura 1.6: Divisão do problema de planejamento estratégico em subproblemas resolvidos sequencialmente

As decisões que a companhia aérea tem de tomar no subproblema de "**Planeamento de Frota**" estão relacionadas com a gestão da frota. Mais concretamente, tendo em conta a composição atual da frota e respetivas características individuais de cada tipo de avião; o conjunto de rotas servidas e potenciais novos destinos; os diferentes tipos de aviões disponíveis para compra (novos ou usados) considerando as respetivas características, prazos de entrega e preço; a companhia aérea pretende determinar quais os *tipos de aviões a comprar e/ou descontinuar* para garantir que a frota está adequada às necessidades da companhia aérea; qual a *quantidade de aviões a comprar e/ou descontinuar de cada tipo*; planear as *datas de início e fim de atividade de cada avião*, por forma a garantir regularidade operacional. Todas as decisões têm necessariamente de ter em conta as restrições orçamentais da companhia aérea.

As decisões tomadas no âmbito do planeamento de frota têm uma enorme influência na competitividade e rentabilidade da companhia aérea. Apesar deste problema não ser objeto de estudo nesta dissertação, os trabalhos de (Sheehan, 2013) e (Belobaba, 2006c) são boas referências para compreender o problema em maior detalhe, assim como as melhores práticas em termos de decisões de gestão de frota.

O problema que será estudado nesta dissertação diz respeito à segunda fase do Processo de Planeamento Estratégico. Tendo em conta a frota disponível, o **Desenho de redes** é composto pelo conjunto de subproblemas diretamente relacionado com a construção da oferta da companhia aérea e dividem-se em quatro subproblemas, nomeadamente, *Estrutura de Rede*, *Estrutura de Bank* caso a companhia aérea funcione numa lógica de HUB, *Planeamento de Rotas* e *Planeamento de Horários*, que por sua vez é decomposto em quatro fases: *Frequências*; *Horários*; *Afetação de frota*; *Afetação de rotações*. De todos os subproblemas apresentados, o **Planeamento de Horários** é o que apresenta um maior contributo para a definição da competitividade de uma companhia aérea.

O subproblema de *estrutura de rede* consiste em definir a estrutura de rede que permita minimizar o custo de transporte, garantindo os fluxos de passageiros orçamentados pela companhia aérea.

Em termos práticos a decisão sobre o tipo de estrutura usado pelas companhias aéreas é tomado na maioria das vezes de forma empírica e reflete a visão das suas equipas de gestão, permanecendo constantes ao longo do tempo. Na maioria dos casos as companhias aéreas **low-cost** adotam uma estrutura *ponto a ponto*, enquanto que as **Network carriers** utilizam sobretudo estruturas *Hub-and-Spoke* ou *mistas*.

Nesta dissertação a otimização da estrutura de rede não será objeto de análise, assumido-se à partida a utilização de uma estrutura *Hub-and-Spoke*.

O planeamento da operação das companhias aéreas é regulado pela *Associação Internacional do Transporte Aéreo* (IATA) e encontra-se dividido em dois períodos do ano. A estação de verão IATA compreende o período entre o último domingo do mês de março e o último sábado de outubro de cada ano. Por sua vez a estação de inverno IATA diz respeito ao período entre o último domingo de outubro de um determinado ano e o último sábado de março do ano seguinte. Neste sentido, apesar de muitas vezes não ser percebido pelos passageiros, as companhias aéreas determinam o seu planeamento de voos para cada estação IATA de forma separada, podendo implicar em algumas situações mudanças de horários ou número de frequências em algumas rotas.

Durante o processo de desenho de redes de uma determinada estação IATA, muitas vezes as companhias aéreas não conseguem operar às horas pretendidas devido a constrangimentos existentes em alguns aeroportos. Para assegurar a utilização eficiente das infraestruturas aeroportuárias e maximizar os benefícios para o maior número de intervenientes possível, foi definida a função de coordenação aeroportuária, através da aplicação de um conjunto de regras contidas nas diretrizes mundiais de slots (Association et al., 2015). Um Slot é uma autorização de operação dada por um coordenador para que a companhia aérea possa utilizar a infraestrutura aeroportuária para chegar ou partir de um aeroporto, numa data e hora específicas. É neste contexto que surge o subproblema de **estrutura de Bank**. Considerando as restrições de atribuição de slots nos diversos aeroportos, o objetivo passa pela definição de horários dos voos de Inbound e Outbound em cada HUB utilizado pela companhia aérea, de forma a garantir conectividade entre voos e por conseguinte maximizar o número de Hit competitivos.

O subproblema **Planeamento de Rotas** pretende determinar o conjunto ótimo de cidades que a companhia aérea deve operar, tendo em conta a restrição da frota e do potencial de cada O&D gerados entre o conjunto alargado de aeroportos. Em (Belobaba, 2006b) encontra-se detalhados alguns modelos usados pelas companhias aéreas.

Devido à enorme complexidade subjacente ao subproblema de **Planeamento de horários**, as companhias aéreas abordam o problema por fases de modo sequencial. A primeira fase pretende determinar o número de **frequências**. Partindo de um conjunto de rotas definidas no subproblema de *Planeamento de Rotas*, pretende-se determinar o número ótimo de frequências em cada rota. De seguida, na fase da definição dos **horários**, pretende-se determinar os horários ótimos dos voos tendo em conta os inputs provenientes da fase anterior e do subproblema de *Estrutura de Bank*. A terceira fase designa-se por **Afetação de Frota** e determina qual o tipo de avião ótimo a afetar a cada rota. A última fase do subproblema de *Planeamento de Horários* designa-se por **Afetação de Rotações** e determina qual o sequenciamento ótimo de cada avião para satisfazer os voos e as necessidades de manutenção.

Tendo em conta o extenso contributo da investigação operacional, pode-se encontrar nos trabalhos de (Belobaba, 2006e), (Bazargan, 2012), detalhes de cada uma das fases deste sub-processo, modelos e métodos de resolução de cada fase do subproblema. Segundo (Barnhart et al., 2003), a otimização individual de cada fase de forma sequencial, apesar do uso de métodos exatos, pode gerar soluções sub-ótimas, visto não ter em conta a globalidade do problema. Assim, os autores identificam a integração das diferentes fases do subproblema como o principal desafio futuro.

A terceira fase do Processo de Planeamento Estratégico designa-se por **Planeamento de Tripulantes**. De acordo com (Yu et al., 2003), o problema é composto por duas partes. A primeira designa-se por **Emparelhamento**, gerando sequências de voos com início e fim na *base da tripulação*, que satisfaçam todas as regras contratuais e leis laborais, sendo que por *base da tripulação* entende-se a cidade onde a tripulação inicia e termina o seu trabalho e não necessariamente onde vive. O objetivo é encontrar um conjunto de sequências que cubra todos os voos com custo mínimo. A segunda parte designa-se por **Escalonamento** e o objetivo é gerar sequências de *emparelhamentos* aos quais serão afetas tripulações. Uma boa solução deste tipo de problemas tem de garantir distribuição equilibrada de trabalho e qualidade de vida aos tripulantes. O *equilíbrio de trabalho*, significa que as companhias aéreas devem

tentar minimizar a variância de horas de voo entre sequências criadas para cada *base da tripulação*. Já a *qualidade de vida* tem em consideração o balanceamento de sequências, compondo sequências que permitam ter dias de folga seguidos.

## 1.4 Objetivo da dissertação

A presente dissertação propõe-se estudar o problema de desenho de redes, apresentando uma metodologia de resolução integrada do conjunto de subproblemas que o compõem, por forma a encontrar boas soluções para uma companhia aérea que utiliza uma estrutura de rede *Hub-and-Spoke*.

Será considerado um caso de estudo com um conjunto de aeroportos e correspondentes fluxos de procura potencial por O&D, entre os quais se encontram três aeroportos com boas localizações geográficas para serem considerados potenciais HUB's. A frota é constituída por aviões de três famílias, com as correspondentes características. Pretende-se definir qual o número e localização ótimo(s) do(s) HUB(s) a utilizar pela companhia aérea, o conjunto de rotas a operar, frequências e horários que gerem boas soluções. O critério de avaliação da qualidade das soluções é composto por três métricas, nomeadamente, potencial de passageiros em termos de preferência horária, produtividade da frota e conectividade da rede.

Do ponto de vista da Investigação Operacional, o problema apresenta uma elevada complexidade. Trata-se de um processo de decisão sobre a afetação ótima de recursos escassos a tarefas ao longo do tempo. Esta complexidade faz com que o problema se enquadre no tipo de problemas de otimização combinatória que pertence à classe NP-completo. Assim, será proposto a utilização de métodos de aproximação, mais concretamente, através da aplicação de uma técnica heurística, para permitir encontrar solução em tempo computacionais aceitáveis, apesar de não garantir otimalidade.

Considerando a preferência horária dos passageiros como um dos critérios de avaliação da qualidade das soluções, existe a necessidade de distribuir o valor total de potencial de procura em cada O&D, pelos diversos slots disponíveis ao longo do período de atividade dos aeroportos. Desta forma, será apresentada uma metodologia para modelação da preferência horária dos passageiros em cada O&D, ao longo do período de atividade de cada aeroporto, considerando intervalos temporais de quinze minutos.

Será adotada uma técnica heurística, mais concretamente, um **Algoritmo Genético**, para abordar o problema integrado de desenho de redes para uma determinada companhia aérea, durante o processo de planeamento estratégico numa determinada estação IATA. Esta metodologia pretende integrar os diversos subproblemas que atualmente são resolvidos pelas companhias aéreas de forma separada. Esta técnica heurística introduzida por Jonh Holland e outros no anos 70, inspira-se na evolução biológica, mais concretamente na teoria darwinista de seleção natural, pertencendo ao conjunto de algoritmos evolucionários que replicam a teoria de evolução das espécies. Cada *cromossoma* representa uma solução admissível codificada para o problema, sendo constituído por um número de elementos que controlam a herança genética, designados por *genes*. A cada cromossoma é atribuída uma *aptidão* em função da combinação de genes que o compõem, representando o valor da solução. O conjunto de cromossomas, designado por *População* representa a geração atual que servirá de base para a evolução dos cromossomas por um processo de seleção e reprodução. Em cada iteração, o algoritmo seleciona um conjunto de cromossomas em função da aptidão, atribuindo maior probabilidade de seleção aos cromossomas mais aptos da população. Recorrendo ao *operador genético* de *cruzamento*, o processo origina uma nova geração de cromossomas, herdando o código genético dos elementos mais aptos para integrar a população por substituição dos cromossomas menos aptos. De forma a introduzir diversidade na população, a cada iteração, uma percentagem de cromossomas sofre uma *mutação* que resulta na modificação aleatória de alguns genes.

Este método mostra independência face ao domínio, permitindo que a *população inicial* seja gerada

aleatoriamente, contudo, podem ser *plantadas* soluções recorrendo a outros métodos heurísticos.

Comparando com outras técnicas heurísticas, uma vantagem do algoritmo genético é a sua capacidade de manter os cromossomas com melhor função aptidão, permitindo que em cada nova geração, a média de valores da função aptidão melhore.

## Capítulo 2

# Definição do Problema

Este capítulo subdivide-se em três partes. Na primeira será feita a descrição do problema onde são apresentados os diversos elementos que compõem o processo de **Desenho de Redes**. Na segunda parte será apresentado o critério de avaliação de rede para o problema. Na terceira parte será descrito o caso de estudo que será objeto de análise nos capítulos subsequentes.

### 2.1 Descrição do Problema

O processo de planeamento estratégico é composto por três fases, nomeadamente *Planeamento de Frota*, *Desenho de Redes* e *Planeamento de Tripulação*. Nesta dissertação a proposta de trabalho consiste na apresentação de um método de resolução integrado para o subproblema de *desenho de redes* de uma companhia aérea. De forma a conhecer o problema na sua globalidade, os diversos elementos que compõem o subproblema de *desenho de redes* serão objeto de análise detalhada em seguida, mais concretamente, as fases de *estrutura de rede*, *estrutura de bank*, *planeamento de rotas* e *planeamento de horários*.

#### 2.1.1 estrutura de rede

O subproblema de *desenho de redes* será abordado através da utilização de uma estrutura *Hub-and-Spoke*. Assumindo como pressuposto a conexão entre todos os voos, a adoção deste tipo de estruturas confere à companhia aérea uma maior eficiência que a estrutura *ponto a ponto*, pois permite servir o mesmo número de cidades utilizando menos voos e consequentemente menos aviões. Esta situação é facilmente comprovada através da comparação das equações de cálculo do número de voos direcionais necessários para servir um conjunto de cidades  $n$  de uma rede aérea. A equação 2.1 representa o número de voos necessários para servir um conjunto  $n$  de cidades utilizando uma estrutura *Hub-and-Spoke*, enquanto a equação 2.2 representa o número de voos necessários para servir um conjunto  $n$  de cidades utilizando uma estrutura *ponto a ponto*.

$$\text{voos direcionais}_{H\&S} = 2(n - 1) \quad (2.1)$$

$$\text{voos direcionais}_{PtP} = n(n - 1) \quad (2.2)$$

A tabela 2.1 reflete ainda a diferença do número de voos necessários para prestar serviços numa rede para o mesmo número de cidades.

Apesar da elevada eficiência que a estrutura *Hub-and-Spoke* oferece, obriga a que todos os O&D que não tenham como origem ou destino o aeroporto **Hub** sejam servidos por tipo de serviço *ligação*, obrigando os passageiros a trocar de voo para completar a sua viagem, além de aumentar a probabilidade de atrasos e perdas de conexão no aeroporto **Hub**. Como consequência, é natural que durante o processo de escolha



Tabela 2.1: Número de voos necessários em cada uma das estruturas para servir o conjunto de  $n$  cidades

Número Cidades $n$	Hub-and-spoke $2(n - 1)$	Ponto a ponto $n(n - 1)$
2	2	2
4	6	12
6	10	30
8	14	56
10	18	90
12	22	132
14	26	182
(...)	(...)	(...)
50	98	2450

de um [Itinerário](#) num determinado [O&D](#), este tipo de serviços se torne menos apetecível na perspetiva dos passageiros.

Por forma a refletir o menor interesse por parte dos passageiros em itinerários não diretos, nesta dissertação, durante o processo de modelação da preferência horária será considerada uma penalização de procura em função do tempo de viagem entre o itinerário mais rápido oferecido pela concorrência e a oferta da companhia aérea. Quanto maior o tempo de viagem face à melhor ligação de um determinado [O&D](#), menos competitiva será a ligação e necessariamente menor será o potencial de passageiros que consegue captar.

### 2.1.2 estrutura de bank

A estrutura de [Banks](#) tem como objetivo maximizar o número de *hits* competitivos, por forma a potenciar a conectividade entre voos e consequentemente a competitividade da companhia aérea face à concorrência. Este objetivo é alcançado através da coordenação de horários de chegadas dos voos [Inbound](#) e partidas dos voos [Outbound](#) no [Hub](#) de forma a minimizar os tempos de espera para o tráfego de ligação.

O conjunto de horários em cada [Hub](#) representa uma solução admissível para o problema da estrutura de [Banks](#), gerando um determinado número de *hits* com tempos de ligação e potenciais de procura diferentes entre si. A otimização da estrutura de [Banks](#) é garantida através da maximização do portfólio de [O&D](#) oferecida e o número de passageiros potenciais que a rede de voos permite captar.

### Infraestruturas aeroportuárias

As estratégias das estruturas de [Banks](#) são fortemente condicionadas pelas infraestruturas aeroportuárias, nomeadamente pela capacidade máxima do fluxo de passageiros no terminal, restrições de [Slot](#) e eficiência operacional.

Durante o processo de escolha dos horários no [Hub](#), a companhia aérea deve ter em consideração a capacidade da infraestrutura em termos de fluxo máximo de passageiros, por forma a não criar constrangimentos em determinados períodos do dia, evitando perdas de ligações e atrasos nos voos.

As restrições de *slots* estão relacionadas com o número máximo de movimentos permitidos por período de tempo em cada aeroporto. Este tipo de restrição deve-se sobretudo ao número de acessos para embarcar e desembarcar passageiros, designado por [Gate](#) que cada aeroporto disponibiliza, assim como as características e número de pistas para aterragem e decolagem. Em certos aeroportos mais congestionados, as companhias têm dificuldade em garantir *slots* em determinados horários, o que pode condicionar as estratégias da companhia aérea. Por uma questão de simplificação, neste trabalho não serão consideradas situações de inibição de operar determinados *slots*.



### Questão temporal dos banks individuais

O método mais eficaz utilizado pelas companhias aéreas para maximizar o número de *hits*, é a definição dos horários numa lógica de **banks**. Um *bank* é constituído por um conjunto de voos **Inbound** e **Outbound**, delimitados por um período de tempo curto. Designa-se por **inbound bank** uma concentração de voos de chegada e por **outbound bank** uma concentração de voos de partida. Por forma a potenciar a conectividade dos voos, tipicamente as companhias aéreas determinam a partida dos *outbound bank* pouco tempo depois das chegadas dos *inbound bank*.

Quanto maior a frota à disposição da companhia aérea, maior a capacidade de concentrar voos em determinados *banks*. Apesar de desejável em termos de maximização de *hits*, a excessiva concentração de voos num determinado *bank* pode provocar perdas de eficiência do aeroporto e consequentemente problemas de conectividade para a companhia aérea. Assim, nesta dissertação, serão valorizadas soluções com baixa concentração de voos por *bank*, sendo desta forma penalizadas as soluções que ultrapassem 5 voos no mesmo período de tempo.

### MCT, MaxCT e direcionalidade

O **MCT** é determinado pelos aeroportos e constitui uma medida de eficiência na prestação de serviços aos passageiros, variando em função da dimensão, recursos e características do aeroporto e dos tipos de aviões que estão envolvidos na ligação. A dimensão dos aeroportos tem normalmente uma correlação positiva face ao **MCT**. Quanto maior a dimensão do aeroporto, maior a distância que os passageiros e bagagens necessitam de percorrer até conectar com outro voo. Neste sentido, as companhias aéreas com **Hub** num aeroporto mais pequenos apresenta tipicamente **MCT** mais curtos que as companhias aéreas com **Hub** em aeroportos maiores.

Assim, cada aeroporto publica a lista de **MCT** que tipicamente apresenta um grande detalhe de informação. Os **MCT** são publicados em função do tipo de ligação: Doméstico-Doméstico, Doméstico-Internacional e Internacional-Internacional. Em alguns casos o nível de especificidade pode ser ainda maior, podendo ir ao detalhe do dia da semana e período horário.

O **MaxCT** representa o tempo máximo de ligação a partir do qual o tempo total de viagem se torna tão grande face à opção mais rápida para um determinado **O&D**, que a probabilidade dos passageiros escolherem este itinerário é muito baixa. Nesse sentido, deixa de se considerar **Hit** competitivo, todas as ligações com tempos superiores ao **MaxCT**.

Idealmente seria desejável considerar **MaxCT** flexível em função do melhor tempo de ligação de cada **O&D**, no entanto, nesta dissertação será usado o método fixo que define o tempo máximo de mais três horas em relação ao **MCT**.

Para garantir um sistema de ligações eficaz, é desejável não contabilizar *hits* em que o voo **Inbound** seja proveniente do mesmo aeroporto que o destino do voo **Outbound**. Assim, numa perspetiva mais abrangente, nesta dissertação serão criados clusters de aeroportos de acordo com a sua localização geográfica, no qual apenas serão contabilizados como *hits* as ligações de voos que pertençam a diferentes localizações geográficas (ver secção 2.3).

### 2.1.3 Planeamento de Rotas

O planeamento de rotas diz respeito ao conjunto de decisões relacionadas com aberturas, cancelamentos ou alterações do tipo de operação, por forma a determinar o conjunto ótimo de rotas que a companhia aérea deve operar, tendo em conta o potencial de passageiros nos diversos **O&D** que atravessam as rotas. A diferente natureza dos componentes de cálculo da rentabilidade trazem uma complexidade acrescida ao problema. Enquanto os custos são calculados por rota, dependendo sobretudo da frota à disposição da companhia aérea e do tipo de afetação de cada avião às rotas, as receitas são calculadas por **O&D** e dependem em grande medida da procura e preços que os passageiros pagam por cada viagem. Assim, para medir a rentabilidade da rede existem tipicamente dois métodos. O primeiro mede a rentabilidade

através do **método agregado da rede**, comparando a soma de todas as receitas por O&D, com a soma dos custos por rota. Como um itinerário pode ser composto por mais do que um voo, este método permite avaliar o impacto da rede em toda a sua globalidade, no entanto, a avaliação individual de uma rota torna-se mais complexa. Já o segundo método permite medir a rentabilidade pelo **método desagregado da rede**, dividindo os resultados em componentes individuais. Neste sentido, a receita é afeta às diversas rotas que compõem a rede em função dos voos que cada passageiro efetivamente utilizou. Quando um itinerário é composto apenas por um voo em cada sentido, designa-se por **receita local**, em que o valor é atribuído na sua totalidade à rota correspondente, enquanto nos casos em que o itinerário é composto por mais que um voo em cada sentido, designa-se por **receita de ligação**, sendo dividido o valor pago pelo passageiro por todas as rotas usadas para completar o O&D, através de um determinado método de rateio, em que o mais comum é ratear a receita em função da distância percorrida em cada um dos voos usados. Este método permite avaliar o desempenho individual das rotas de forma mais direta, no entanto, não garante avaliar a rede em toda a sua abrangência.

Um dos critérios de avaliação usado no âmbito desta dissertação é o potencial de passageiros em termos de preferência horária. Nesse sentido, utilizando o *método agregado de rede*, pretende-se aumentar a cobertura de mercados às soluções que a companhia aérea oferece, sobretudo através da adição de rotas com elevado potencial de procura. Quanto melhor a qualidade dos itinerários, maior a probabilidade de aumentar o potencial de passageiros. Como os itinerários *non-stop* já são por natureza os melhores em termos de qualidade do itinerário, apenas serão avaliados os itinerários de ligação.

### Rácio de desvio geográfico

O rácio de desvio geográfico permite identificar ligações competitivas num determinado Hub para diversos O&D, adicionando à solução rotas que permitam aumentar a cobertura de rede com boa qualidade de itinerários. Na figura 2.1 encontra-se representado um exemplo de cálculo do desvio geográfico (medido em tempo de voo) para o O&D SL3-ES1 via Hub que apenas implica um desvio de 1.111 vezes o tempo de voo do itinerário direto, não considerando o tempo de ligação no aeroporto Hub.

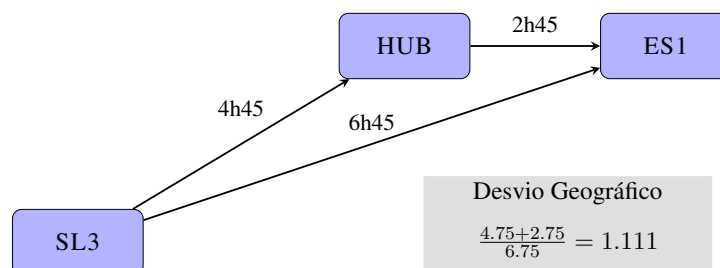


Figura 2.1: Exemplo de cálculo do rácio de desvio geográfico para o itinerário SL3-HUB-ES1 que oferece serviço entre O&D SL3-ES1

Através do cálculo do rácio de desvio geográfico, os O&D serão segmentados pelos diversos HUB's potenciais, para posteriormente, de acordo com as necessidades de cada solução, serem adicionadas rotas que maximizem a diversidade de mercados com elevada probabilidade de gerar itinerários de qualidade.

#### 2.1.4 Planeamento de Horários

O problema de planeamento de horários é composto por um conjunto de quatro subproblemas que serão apresentados em seguida.

##### Planeamento de Frequências

No problema de planeamento de frequências, pretende-se determinar o número de voos a operar em cada rota que permita maximizar o fluxo de passageiros potenciais em termos de preferência horária nos

diversos O&D que atravessam as rotas. A adição de frequências permite aumentar a densidade de voos nas rotas com maior potencial de passageiros, por forma a não restringir o fluxo de passageiros.

A avaliação da necessidade de incremento de frequências em determinadas rotas que compõem as soluções de rede, será feita através da comparação entre a capacidade oferecida na rota e a soma dos fluxos potenciais de passageiros nos diversos O&D que atravessam cada rota.

### Definição dos horários

Os problemas de planeamento de horários e estrutura de Banks estão relacionados na medida em que ambos têm influência no planeamento de horários dos voos. Para as companhias aéreas que não operam numa lógica de Hub, como não existe necessidade de garantir conectividade entre voos, o planeamento de horários é determinado apenas nesta fase.

Operando numa estrutura de *Hub-and-spoke*, a conectividade torna-se um fator crítico de sucesso, nesse sentido o planeamento de horários é determinado na fase de estrutura de Banks. No âmbito desta dissertação, o problema de desenvolvimento de horários tem como função garantir que em rotas com mais de uma frequência, os horários dos voos se encontrem afastados entre si. Nesse sentido, o incremento de frequências numa solução de rede será efetuado de forma a que a frequência adicional fique distanciada idealmente a pelo menos duas horas de distância das outras frequências.

### Afetação de Frota

No problema de afetação da frota, pretende-se determinar o tipo de equipamentos a operar em cada voo, tendo em conta a autonomia de cada tipo de avião, procura potencial estimada e a capacidade dos aviões. Os problemas de afetação de frota e planeamento de frequências estão relacionados, na medida em que para uma determinada procura que exceda a capacidade oferecida, as companhias aéreas podem optar por adicionar frequências, ou afetar um avião de maior capacidade à rota.

Cada tipo de avião apresenta um conjunto de características, entre as quais a autonomia de horas em voo e a capacidade. Nesta dissertação, a afetação dos aviões às rotas será garantida através da segmentação de rotas em função das distâncias entre aeroportos. Assim, tendo em conta os tempos de voos necessários para cada rota e as autonomias dos tipos de aviões da frota, cada avião apenas pode ser afeto a um subgrupo de rotas pré-definido. Apesar de admissível, não serão consideradas por exemplo soluções com aviões de grande autonomia afetos a rotas de curta distância.

### Afetação de Rotação

No problema de rotação dos aviões, pretende-se determinar a sequência de voos ótima de modo a minimizar o número de aviões necessários para cobrir todos os voos da rede.

Este é um problema de otimização combinatória de elevada complexidade, no qual será proposto um algoritmo de sequenciamento de tarefas para cada avião da frota de acordo com o subgrupo de rotas pré-definido segundo o método apresentado no problema de afetação da frota.

## 2.2 Critério de avaliação da rede

As companhias aéreas desenham as suas redes com o propósito de maximizar o seu lucro potencial, no entanto, as decisões relacionadas com a construção da rede são tomadas a longo prazo, quando ainda existe uma grande incerteza sobre as condições de mercado e a oferta da concorrência. Nesse sentido, as companhias aéreas suportam as suas decisões com base em critérios que apesar de não garantirem a otimalidade, são bons indicadores da qualidade da solução de rede e consequentemente um bom barómetro para avaliar o desempenho da companhia aérea. Assim, nesta dissertação considera-se que uma boa solução de rede deve responder a três objetivos principais, mais concretamente, potencial de passageiros em termos de preferência horária, conectividade da rede e produtividade da frota.

### 2.2.1 Potencial de passageiros

Considerando os  $n$  O&D servidos pela rede, sendo o seu conjunto definido por  $I = (1, \dots, n)$ ,  $X_i$  a quantidade de bilhetes vendidos no O&D $_i$  e  $P_i$  o preço médio unitário originado no O&D $_i$ , a receita total da rede é calculada pela equação 2.3.

$$\text{Receita Total} = \sum_{i=1}^n X_i P_i \quad (2.3)$$

Considere-se o conjunto de voos operados na rede, definido por  $J = (1, \dots, m)$  e onde  $C_j, \forall j \in J$ , representa a capacidade do voo  $j \in J$ .

Seja ainda  $D_i, \forall i \in I$ , a estimativa de procura em cada O&D, com a matriz  $A = a_{ij} \in (0, 1)$  assumindo valor 1 se o O&D  $i$  atravessa o voo  $j$  e 0 caso contrário, a estimativa de procura agregada em cada voo  $AD_j$  é definida pela equação 2.4,

$$AD_j = \sum_{i=1}^n D_i \cdot a_{ij}, \forall j \in J \quad (2.4)$$

Sendo  $D_i$  o principal dinamizador de  $P_i$ , na medida em que, de um modo geral, nos casos em que  $AD_j \geq C_j$  os valores de  $P_i$  são tipicamente altos, enquanto que para  $AD_j < C_j$  as companhias aéreas são obrigadas a baixar preços e introduzir promoções por forma a estimular  $D_i$ , gerando valores de  $P_i$  tipicamente baixos.

Devido à grande incerteza da procura, o critério de avaliação da qualidade da rede em termos de procura é determinado através da modelação da preferência horária dos passageiros.

### 2.2.2 conectividade de rede

Para cada Hub, considere-se o conjunto de voos com origem ou destino no Hub particionado em  $J = K \cup L$ , em que  $K = \{1, \dots, w\}$  corresponde ao conjunto de voos de chegada (Inbound) ao Hub e  $L = \{1, \dots, v\}$  representa o conjunto de voos de partida (Outbound) do Hub. Cada voo Inbound,  $k$ , tem associado uma localização geográfica de origem,  $g(k)$ , e um slot,  $s(k)$ . De igual forma, cada voo Outbound,  $l$ , tem associado uma localização geográfica de destino,  $g(l)$ , e um slot,  $s(l)$ . Note-se que, os slots  $s(k)$  e  $s(l)$  pertencem ao conjunto de slots disponíveis no Hub,  $S$ .

Considera-se Hit admissível qualquer par de voos inbound/outbound,  $(k, l)$ , tais que  $g(k) \neq g(l)$  e o tempo de ligação no hub, estiver compreendido entre o MCT e o MaxCT, ou seja

$$\text{MCT} \leq \text{Tempo}_{(k,l)} \leq \text{MaxCT} \quad (2.5)$$

No qual  $\text{Tempo}_{(k,l)}$ , é como,

$$\text{Tempo}_{(k,l)} = s_l - s_k \quad (2.6)$$

De modo a evitar constrangimentos do Hub resultantes de excessiva concentração de voos num determinado Slot,  $s \in S$ , introduzem-se duas restrições de forma a limitar superiormente, tanto o número de voos de chegada, pela inequação 2.7 como o número de voos de partida, pela inequação 2.8 no mesmo Slot.

$$\#\{k \in K : s(k) = s\} \leq 5 \quad \forall s \in S \quad (2.7)$$

$$\#\{l \in L : s(l) = s\} \leq 5 \quad \forall s \in S \quad (2.8)$$

Seja  $H$  um conjunto de hits admissíveis, ou seja

$$H = \{(k, l) : k \in K, l \in L, \text{ e } (k, l) \text{ é admissível}\}$$

No qual se pretende determinar a combinação de voos que maximize o número de *hits* admissíveis da rede, 2.9.

$$\max \#H \quad (2.9)$$

### 2.2.3 Produtividade da frota

O critério considerado para avaliar a produtividade da frota pretende medir a taxa de utilização média da frota medida em horas por dia, nesse sentido será adaptada da formula de **Utilização de Avião**.

A forma que as companhias aéreas têm para gerar receita é através da utilização dos aviões, dessa forma, quanto maior o tempo de voo, maior a probabilidade de gerar receita. Neste sentido, considera-se como método de cálculo a equação 2.10 que se designa como **utilização ajustada**.

$$\text{utilização ajustada} = \frac{\sum_{j=1}^m \text{tempo de voo}_j}{m} \quad (2.10)$$

## 2.3 Descrição do Caso de Estudo

De acordo com a descrição do problema apresentado, considera-se um conjunto de 23 aeroportos, os respetivos potenciais de procura por O&D e frota composta por 15 aviões distribuídas por três tipos. Assumindo como pressuposto a utilização de uma *estrutura de rede hub-and-spoke*, o problema de *desenho de redes* tem como objetivo definir o *número e localização do(s) HUB(s)*, que permita suportar a *seleção de um conjunto de rotas, número de frequências em cada rota e respetivos horários dos voos*, por forma a gerar uma boa solução de rede em termos do *número de passageiros potenciais, conectividade e produtividade*.

### 2.3.1 Aeroportos

Assumindo a localização tal como representada na figura 2.2, considera-se que os aeroportos se encontram divididos em dois grupos distintos. O primeiro grupo é composto por três aeroportos centrais, que devido ao seu posicionamento geográfico e tamanho, serão considerados como potenciais *HUB's*. Pretende-se que a definição do número ótimo de *HUB's* e respetiva localização seja determinada durante o processo de otimização. O segundo grupo é composto por 20 aeroportos considerados potenciais *Spokes*, localizados na periferia dos *HUB's*, dispostos em função da respetiva zona geográfica.

Para cada aeroporto, existe um conjunto de características que devem ser levados em conta durante o processo de otimização, tal como representados na tabela 2.2. Nesta caso de estudo a localização dos aeroportos é determinada através de coordenadas cartesianas (x,y), sendo facilmente convertível numa situação real para localização por coordenadas geográficas, sem necessidade de alterar os pressupostos deste trabalho. Uma das principais características dos aeroportos que funcionam como restrição para as definições da operação das companhias aéreas, está relacionada com os horários de funcionamento dos aeroportos. Considerando o elevado ruído gerado nos aeroportos e a proximidade das populações, alguns governos restringem por via de legislação local a operação no período noturno, fazendo com que os períodos de atividade variem em função do aeroporto, assim, no âmbito desta dissertação serão considerados diferentes horários de abertura e fecho para os diversos aeroportos. Além do período de atividade dos aeroportos, serão consideradas diferentes zonas horárias em função da localização dos aeroportos, sendo convertidas posteriormente para horário **UTC**, tal como em ambiente real serão consideradas neste caso de estudo.

### 2.3.2 Matriz de tempos de voo

Numa situação real, de acordo com as diferentes localizações, determinam-se as distâncias ortodrómicas entre aeroportos, que representam as distâncias mais curtas entre dois pontos na superfície terrestre e

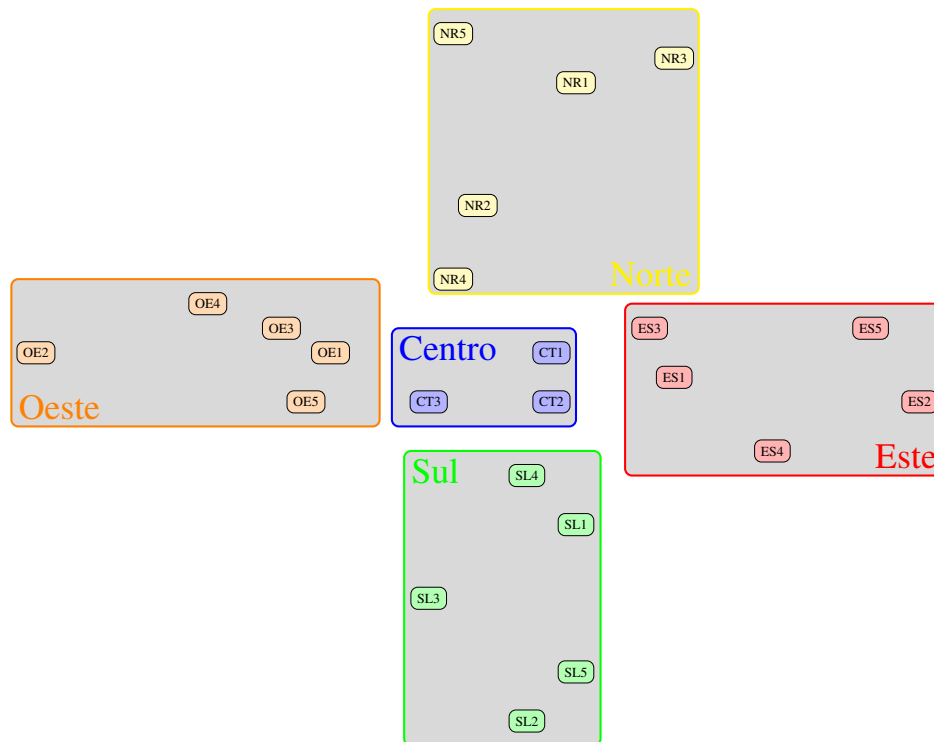


Figura 2.2: Localização dos aeroportos potenciais da rede

Tabela 2.2: Informação sobre horários de funcionamento dos aeroportos potenciais a operar

cidade	x	y	Abertura	Fecho	UTC
NR1	12.00	13.50	0.00	24.00	0
NR2	10.00	11.00	5.00	22.75	-1
NR3	14.00	14.00	7.00	22.00	1
NR4	9.50	9.50	6.00	23.00	-1
NR5	9.50	14.50	5.50	23.75	-1
CT1	11.50	8.00	7.00	22.00	0
CT2	11.50	7.00	5.00	22.75	0
CT3	9.00	7.00	0.00	24.00	-1
SL1	12.00	4.50	6.00	23.00	0
SL2	11.00	0.50	0.00	24.00	0
SL3	9.00	3.00	5.50	23.75	-1
SL4	11.00	5.50	5.00	22.75	0
SL5	12.00	1.50	7.00	22.00	0
ES1	14.00	7.50	6.00	23.00	1
ES2	19.00	7.00	7.00	22.00	3
ES3	13.50	8.50	0.00	24.00	1
ES4	16.00	6.00	5.50	23.75	2
ES5	18.00	8.50	5.00	22.75	3
OE1	7.00	8.00	7.00	22.00	-2
OE2	1.00	8.00	3.00	21.00	-5
OE3	6.00	8.50	6.00	23.00	-2
OE4	4.50	9.00	5.50	23.75	-3
OE5	6.50	7.00	0.00	24.00	-2

em seguida os tempos de voo. Neste estudo de caso, como as localizações foram simplificadas para coordenadas cartesianas, os tempos de voo foram calculados através da distância euclidiana entre dois pontos, recorrendo posteriormente a um ligeiro ajuste por forma a determinar tempos totais de voo em intervalos de 15 minutos, sendo os tempos de voos mínimos do voo direto apresentados na matriz da tabela 2.4.

Tabela 2.3: Matriz com tempo de voo necessários em cada rota

	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	CT1	CT2	CT3	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	OE1	OE2	OE3	OE4	OE5
NR1	0.00	3.25	2.25	4.75	2.75	5.75	6.75	7.25	9.00	13.25	11.00	8.25	12.00	6.50	9.75	5.25	8.50	8.00	7.50	12.50	8.00	8.75	8.75
NR2	3.25	0.00	5.00	1.75	3.75	3.50	4.50	4.25	7.00	10.75	8.25	5.75	9.75	5.50	10.00	4.50	8.00	8.50	4.25	9.50	4.75	6.00	5.50
NR3	2.25	5.00	0.00	6.50	4.75	6.50	7.50	8.75	9.75	14.00	12.25	9.25	12.75	6.50	8.75	5.75	8.25	7.00	9.25	14.50	9.75	10.75	10.50
NR4	4.75	1.75	6.50	0.00	5.00	2.50	3.25	2.75	5.75	9.25	6.75	4.50	8.50	5.00	10.00	4.25	7.50	8.75	3.00	8.75	3.75	5.25	4.00
NR5	2.75	3.75	4.75	5.00	0.00	7.00	8.00	7.75	10.50	14.25	11.75	9.25	13.25	8.50	12.25	7.25	10.75	10.50	7.00	10.75	7.00	7.50	8.25
CT1	5.75	3.50	6.50	2.50	7.00	0.00	1.00	2.75	3.75	7.75	5.75	2.75	6.75	2.75	7.75	2.25	5.00	6.75	4.50	10.50	5.75	7.25	5.25
CT2	6.75	4.50	7.50	3.25	8.00	1.00	0.00	2.50	2.75	6.75	4.75	1.75	5.75	2.75	7.50	2.50	4.75	6.75	4.75	10.75	5.75	7.50	5.00
CT3	7.25	4.25	8.75	2.75	7.75	2.75	2.50	0.00	4.00	7.00	4.00	2.50	6.50	5.25	10.00	4.75	7.25	9.25	2.25	8.25	3.50	5.00	2.50
SL1	9.00	7.00	9.75	5.75	10.50	3.75	2.75	4.00	0.00	4.25	3.50	1.50	3.00	3.75	7.50	4.50	4.50	7.25	6.25	11.75	7.25	8.75	6.25
SL2	13.25	10.75	14.00	9.25	14.25	7.75	6.75	7.00	4.25	0.00	3.25	5.00	1.50	7.75	10.50	8.50	7.50	10.75	8.50	12.50	9.50	10.75	8.00
SL3	11.00	8.25	12.25	6.75	11.75	5.75	4.75	4.00	3.50	3.25	0.00	3.25	3.50	6.75	11.00	7.25	7.75	10.75	5.50	9.50	6.50	7.50	4.75
SL4	8.25	5.75	9.25	4.50	9.25	2.75	1.75	2.50	1.50	5.00	3.25	0.00	4.25	3.75	8.25	4.00	5.25	7.75	4.75	10.50	6.00	7.50	4.75
SL5	12.00	9.75	12.75	8.50	13.25	6.75	5.75	6.50	3.00	1.50	3.50	4.25	0.00	6.50	9.00	7.25	6.25	9.25	8.25	13.00	9.25	10.75	8.00
ES1	6.50	5.50	6.50	5.00	8.50	2.75	2.75	5.25	3.75	7.75	6.75	3.75	6.50	0.00	5.25	1.25	2.50	4.25	7.25	13.25	8.25	9.75	7.75
ES2	9.75	10.00	8.75	10.00	12.25	7.75	7.50	10.00	7.50	10.00	11.00	8.25	9.00	5.25	0.00	5.75	3.25	2.00	12.25	18.25	13.25	14.75	12.50
ES3	5.25	4.50	5.75	4.25	7.25	2.25	2.50	4.75	4.50	8.50	7.25	4.00	6.25	1.25	5.75	0.00	3.75	4.50	6.75	12.75	7.50	9.25	7.25
ES4	8.50	8.00	8.25	7.50	10.75	5.00	4.75	7.25	4.50	7.50	7.75	5.25	7.25	2.50	3.25	3.75	0.00	3.25	9.25	15.25	10.50	12.00	9.75
ES5	8.00	8.50	7.00	8.75	10.50	6.75	6.75	7.25	7.25	10.75	10.75	7.75	9.25	4.25	2.00	4.50	3.25	0.00	11.25	17.25	12.00	13.75	11.75
OE1	7.50	4.25	9.25	3.00	7.00	4.50	4.75	2.25	6.25	8.50	5.50	4.75	8.25	7.25	12.25	6.75	9.25	11.25	0.00	6.00	1.25	2.75	1.25
OE2	12.50	9.50	14.50	8.75	10.75	10.50	10.75	8.25	11.75	12.50	9.50	10.50	13.25	13.25	18.25	12.75	15.25	17.25	6.00	0.00	5.25	3.75	5.75
OE3	8.00	4.75	9.75	3.75	7.00	5.75	5.75	3.50	7.25	9.50	6.50	6.00	9.25	8.25	13.25	7.50	10.50	12.00	1.25	5.25	0.00	1.75	1.75
OE4	8.75	6.00	10.75	5.25	7.50	7.25	7.50	5.00	8.75	10.75	7.50	7.50	10.75	9.75	14.75	9.25	12.00	13.75	2.75	3.75	1.75	0.00	3.00
OE5	8.75	5.50	10.50	4.00	8.25	5.25	5.00	2.50	6.25	8.00	4.75	4.75	8.00	7.75	12.50	7.25	9.75	11.75	1.25	5.75	1.75	3.00	0.00

Tabela 2.4: Matriz com o melhor tempo de voo da concorrência em cada O&amp;D

	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	CT1	CT2	CT3	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	OE1	OE2	OE3	OE4	OE5
NR1	0.00	3.25	2.25	5.75	2.75	5.75	6.75	8.00	9.00	13.25	12.25	8.25	12.00	6.50	12.75	5.25	9.50	9.00	7.50	12.50	8.00	9.75	8.75
NR2	3.25	0.00	5.00	1.75	3.75	4.00	4.50	4.25	7.00	13.00	8.25	6.50	9.75	6.75	10.00	4.50	8.00	8.50	4.25	9.50	4.75	6.00	6.25
NR3	2.25	5.00	0.00	8.00	5.25	6.50	7.50	8.75	9.75	18.25	13.50	10.25	12.75	8.00	9.75	5.75	8.25	7.00	9.25	14.50	9.75	10.75	10.50
NR4	5.75	1.75	8.00	0.00	6.50	2.75	3.25	2.75	6.50	9.25	6.75	4.50	8.50	5.00	10.00	4.25	7.50	9.75	3.00	8.75	3.75	5.25	4.00
NR5	2.75	3.75	5.25	6.50	0.00	7.75	9.00	10.25	10.50	15.75	13.00	9.25	13.25	10.25	12.25	9.50	10.75	10.50	7.00	10.75	8.50	7.50	8.25
CT1	5.75	4.00	6.50	2.75	7.75	0.00	1.00	3.50	3.75	7.75	7.00	3.50	6.75	2.75	7.75	2.25	5.50	7.50	5.50	12.75	5.75	8.00	5.25
CT2	6.75	4.50	7.50	3.25	9.00	1.00	0.00	2.50	2.75	6.75	5.25	1.75	6.50	2.75	7.50	2.75	4.75	6.75	4.75	12.00	6.50	9.00	5.50
CT3	8.00	4.25	8.75	2.75	10.25	3.50	2.50	0.00	4.50	7.00	5.00	2.50	7.25	6.00	11.00	4.75	7.25	11.25	3.00	10.00	3.50	5.00	2.50
SL1	9.00	7.00	9.75	6.50	10.50	3.75	2.75	4.50	0.00	4.25	4.00	1.75	3.00	5.00	7.50	5.00	6.00	8.00	6.25	15.50	8.00	8.75	6.25
SL2	13.25	13.00	18.25	9.25	15.75	7.75	6.75	7.00	4.25	0.00	3.25	5.00	1.50	10.25	11.75	8.50	7.50	13.00	9.50	13.75	9.50	13.00	9.00
SL3	12.25	8.25	13.50	6.75	13.00	7.00	5.25	5.00	4.00	3.25	0.00	3.25	3.50	6.75	12.25	7.25	8.75	12.00	5.50	9.50	6.50	7.50	5.25
SL4	8.25	6.50	10.25	4.50	9.25	3.00	1.75	2.50	1.75	5.00	3.25	0.00	4.75	3.75	9.25	4.00	5.25	8.75	4.75	11.75	6.75	9.00	5.25
SL5	12.00	9.75	12.75	8.50	13.25	6.75	6.50	7.25	3.00	1.50	3.50	4.75	0.00	6.50	9.00	8.00	6.25	10.25	9.25	14.50	9.25	12.00	8.00
ES1	6.50	6.75	8.00	5.00	10.25	2.75	2.75	6.00	5.00	10.25	6.75	3.75	6.50	0.00	6.00	1.50	2.50	4.25	7.25	13.25	8.25	9.75	8.75
ES2	12.75	10.00	9.75	10.00	12.25	7.75	7.50	11.00	7.50	11.75	12.25	9.25	9.00	6.00	0.00	5.75	3.25	2.25	13.50	20.25	17.25	19.25	15.00
ES3	5.25	4.50	5.75	4.25	9.50	2.25	2.75	4.75	5.00	8.50	7.25	4.00	8.00	1.50	5.75	0.00	4.50	5.00	7.50	12.75	7.50	10.25	7.25
ES4	9.50	8.00	8.25	7.50	10.75	5.50	4.75	7.25	6.00	7.50	8.75	5.25	6.25	2.50	3.25	4.50	0.00	3.25	9.25	15.25	10.50	14.50	10.75
ES5	9.00	8.50	7.00	9.75	10.50	7.50	6.75	11.25	8.00	13.00	12.00	8.75	10.25	4.25	2.25	5.00	3.25	0.00	11.25	19.00	12.00	13.75	11.75
OE1	7.50	4.25	9.25	3.00	7.00	5.50	4.75	3.00	6.25	9.50	5.50	4.75	9.25	7.25	13.50	7.50	9.25	11.25	0.00	6.00	1.25	3.50	1.50
OE2	12.50	9.50	14.50	8.75	10.75	12.75	12.00	10.00	15.50	13.75	9.50	11.75	14.50	13.25	20.25	12.75	15.25	19.00	6.00	0.00	5.25	3.75	5.75
OE3	8.00	4.75	9.75	3.75	8.50	5.75	6.50	3.50	8.00	9.50	6.50	6.00	9.25	8.25	17.25	7.50	10.50	12.00	1.25	5.25	0.00	1.75	2.00
OE4	9.75	6.00	10.75	5.25	7.50	8.00	9.00	5.00	8.75	13.00	7.50	9.00	12.00	9.75	19.25	10.25	14.50	13.75	3.50	3.75	1.75	0.00	3.00
OE5	8.75	6.25	10.50	4.00	8.25	5.25	5.50	2.50	6.25	9.00	5.25	5.25	8.00	8.75	15.00	7.25	10.75	11.75	1.50	5.75	2.00	3.00	0.00

### 2.3.3 Frota

Será considerada uma frota composta por 15 aviões de três tipos diferentes, tal como representado na tabela 2.5, em que cada tipo de avião se caracteriza por diferentes capacidades, autonomias de voo sem necessidade de reabastecer e tempo mínimo necessário para preparar o avião para um novo voo. Partindo de uma frota pré-determinada, o intuito desta dissertação é encontrar o desenho de rede que apresente melhores resultados em termos de potencial de passageiros, produtividade da frota e conectividade do Hub. Apesar de estar fora do âmbito deste trabalho, a metodologia apresentada também pode ser aplicada ao problema de planeamento de frota de longo prazo, testando diferentes configurações de frota e avaliando a configuração de frota que apresenta melhores resultados para o caso de estudo, permitindo dessa forma ser um suporte à decisão.



Tabela 2.5: Informação sobre o tipo de frota à disposição da companhia aérea

Tipo de aviões	Número de aviões	Capacidade	AUTONOMIA	TAT
1	5	250	12:00	1:30
2	5	180	06:00	1:00
3	5	120	03:00	0:45

### 2.3.4 Potencial de Procura

Para avaliar o potencial de procura para os diferentes O&D, será considerada a média de passageiros potenciais estimada para cada O&D em valores agregados não direcionais, representada na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Matriz de potencial de procura média diária por O&amp;D

	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	CT1	CT2	CT3	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	OE1	OE2	OE3	OE4	OE5
NR1	0	230	4138	941	691	3604	4809	1236	4463	4709	1711	4327	3819	315	4040	3022	2915	1866	1385	1385	2872	5544	5062
NR2		0	1077	3835	3557	5612	4816	5327	1635	1249	5756	1258	1001	2858	3783	3670	3333	88	988	5434	2127	1331	3835
NR3			0	2967	1773	2333	5583	2695	2503	271	5082	636	1352	2791	4223	66	3065	4416	3330	5434	3983	3040	2106
NR4				0	1129	3826	2694	999	2167	2910	2340	1137	5829	2890	863	516	3855	1833	2583	4529	575	1224	3568
NR5					0	5012	3019	3657	1488	4683	4827	4878	1288	4816	2378	1001	2115	2739	674	315	209	3120	2303
CT1						0	2363	2815	3055	3161	4697	516	2815	4625	1874	1559	3767	3107	5469	6084	2896	2312	2512
CT2							0	2120	140	1222	734	1062	966	3618	2557	1129	3783	2200	571	6414	5021	2503	450
CT3								0	4749	1866	1773	2815	1711	2115	4237	1096	4717	51	5838	2167	6414	3175	2363
SL1									0	3161	5082	3870	471	2104	4720	1030	4486	2673	2115	4183	5327	691	66
SL2										0	3250	5134	5925	1128	1398	3848	550	3040	2409	2653	230	2618	1554
SL3											0	416	511	532	4525	4717	2739	5829	1096	2312	3631	356	2104
SL4												0	5925	1593	2969	2967	3519	4614	5441	156	5156	2777	1013
SL5													0	1266	6434	2784	3304	2745	418	836	1831	5544	1526
ES1														0	636	678	3019	2333	5434	4683	2370	1454	3065
ES2															0	1013	1559	2695	4005	2228	1220	819	4056
ES3																0	5925	1399	2104	4068	1696	1818	4040
ES4																	0	1461	2365	4576	1711	516	3401
ES5																		0	3065	3733	1258	2119	1062
OE1																			0	3277	2497	1407	2474
OE2																				0	678	2632	4939
OE3																					0	678	3952
OE4																						0	1383
OE5																							0

De modo a identificar a direcionalidade de cada fluxo de tráfego nos diferentes O&D, serão considerados os pesos de vendas dos diversos POC, tal como representado na tabela 2.7.

Tabela 2.7: Matriz de peso de vendas dos POC em cada O&amp;D

	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	CT1	CT2	CT3	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	OE1	OE2	OE3	OE4	OE5
NR1	0.00	0.44	0.48	0.54	0.45	0.62	0.43	0.53	0.62	0.38	0.30	0.30	0.65	0.55	0.32	0.55	0.30	0.37	0.35	0.64	0.46	0.47	0.34
NR2	0.56	0.00	0.47	0.45	0.66	0.67	0.64	0.37	0.60	0.50	0.48	0.54	0.40	0.44	0.34	0.47	0.66	0.54	0.48	0.41	0.53	0.46	0.31
NR3	0.52	0.53	0.00	0.34	0.44	0.33	0.65	0.34	0.65	0.52	0.41	0.69	0.50	0.68	0.66	0.45	0.70	0.51	0.49	0.33	0.32	0.64	0.52
NR4	0.46	0.55	0.66	0.00	0.40	0.70	0.39	0.46	0.54	0.57	0.50	0.69	0.48	0.57	0.30	0.39	0.56	0.41	0.33	0.36	0.32	0.64	0.47
NR5	0.55	0.34	0.56	0.60	0.00	0.35	0.62	0.67	0.65	0.53	0.55	0.64	0.69	0.60	0.62	0.50	0.45	0.61	0.65	0.51	0.64	0.51	0.30
CT1	0.38	0.33	0.67	0.30	0.65	0.00	0.53	0.70	0.43	0.68	0.47	0.40	0.48	0.57	0.44	0.46	0.37	0.52	0.32	0.61	0.53	0.47	0.30
CT2	0.57	0.36	0.35	0.61	0.38	0.47	0.00	0.61	0.44	0.47	0.41	0.67	0.41	0.64	0.38	0.60	0.63	0.35	0.44	0.68	0.63	0.64	0.41
CT3	0.47	0.63	0.66	0.54	0.33	0.30	0.39	0.00	0.30	0.65	0.70	0.52	0.67	0.63	0.60	0.51	0.56	0.47	0.48	0.48	0.54	0.52	0.57
SL1	0.38	0.40	0.35	0.46	0.35	0.57	0.56	0.70	0.00	0.65	0.51	0.61	0.45	0.52	0.30	0.31	0.63	0.59	0.32	0.39	0.70	0.34	0.37
SL2	0.62	0.50	0.48	0.43	0.47	0.32	0.53	0.35	0.35	0.00	0.49	0.62	0.35	0.64	0.70	0.50	0.31	0.33	0.33	0.56	0.57	0.30	0.67
SL3	0.70	0.52	0.59	0.50	0.45	0.53	0.59	0.30	0.49	0.51	0.00	0.50	0.34	0.36	0.34	0.60	0.70	0.65	0.54	0.60	0.57	0.60	0.48
SL4	0.70	0.46	0.31	0.31	0.36	0.60	0.33	0.48	0.39	0.38	0.50	0.00	0.30	0.52	0.56	0.53	0.53	0.57	0.31	0.50	0.68	0.33	0.52
SL5	0.35	0.60	0.50	0.52	0.31	0.52	0.59	0.33	0.55	0.65	0.66	0.70	0.00	0.66	0.69	0.70	0.38	0.65	0.68	0.55	0.67	0.63	0.57
ES1	0.45	0.56	0.32	0.43	0.40	0.43	0.36	0.37	0.48	0.36	0.64	0.48	0.34	0.00	0.47	0.33	0.59	0.65	0.39	0.33	0.58	0.63	0.46
ES2	0.68	0.66	0.34	0.70	0.38	0.56	0.62	0.40	0.70	0.30	0.66	0.44	0.31	0.53	0.00	0.59	0.32	0.68	0.60	0.31	0.44	0.34	0.44
ES3	0.45	0.53	0.55	0.61	0.50	0.54	0.40	0.49	0.69	0.50	0.40	0.47	0.30	0.67	0.41	0.00	0.36	0.41	0.33	0.57	0.48	0.55	0.67
ES4	0.70	0.34	0.30	0.44	0.55	0.63	0.37	0.44	0.37	0.69	0.30	0.47	0.62	0.41	0.68	0.64	0.00	0.66	0.37	0.50	0.60	0.58	0.34
ES5	0.63	0.46	0.49	0.59	0.39	0.48	0.65	0.53	0.41	0.67	0.35	0.43	0.35	0.32	0.59	0.34	0.00	0.30	0.54	0.55	0.49	0.35	
OE1	0.65	0.52	0.51	0.67	0.35	0.68	0.56	0.52	0.68	0.67	0.46	0.69	0.32	0.61	0.40	0.67	0.63	0.70	0.00	0.60	0.48	0.70	0.64
OE2	0.36	0.59	0.67	0.64	0.49	0.39	0.32	0.52	0.61	0.44	0.40	0.50	0.45	0.67	0.69	0.43	0.50	0.46	0.40	0.00	0.60	0.39	0.55
OE3	0.54	0.47	0.68	0.68	0.36	0.47	0.37	0.46	0.30	0.43	0.43	0.32	0.33	0.42	0.56	0.52	0.40	0.45	0.52	0.40	0.00	0.44	0.52
OE4	0.53	0.54	0.36	0.36	0.49	0.53	0.36	0.48	0.66	0.70	0.40	0.67	0.37	0.37	0.66	0.45	0.42	0.51	0.30	0.61	0.56	0.00	0.58
OE5	0.66	0.69	0.48	0.53	0.70	0.70	0.59	0.43	0.63	0.33	0.52	0.48	0.43	0.54	0.56	0.33	0.66	0.65	0.36	0.45	0.48	0.42	0.00



## Capítulo 3

# Preferência de passageiros

A compra de um bilhete para uma viagem num determinado **O&D**, estabelece uma relação contratual entre um passageiro e uma companhia aérea. Na ótica da companhia aérea, a decisão do passageiro resultou na venda de um determinado **Itinerário**, que, tanto pode representar um **Voo**, ou uma sequência de voos na sua rede. O processo de decisão tem início na vontade do **decisor**, que de acordo com um conjunto de **alternativas** conhecidas e consideradas viáveis, compara uma série de **atributos** em cada alternativa, escolhendo como **critério** de decisão a maximização da sua utilidade.

É neste contexto que o conhecimento do comportamento da procura em cada **O&D** se revela central para determinar uma boa solução do problema de *desenho de rede*. Este capítulo encontra-se dividido em três partes. Na primeira parte será proposta uma metodologia de modelação da preferência horária dos passageiros, tendo por base o potencial de procura e direcionalidade em cada **O&D**. Na segunda parte, serão abordados os diferentes pressupostos de modelação da procura em função do tipo de serviço (direto ou ligação). Na terceira parte será aplicada a metodologia ao caso de estudo.

### 3.1 Metodologia

Cada **Itinerário** é composto por um par de horários representando as horas de partida e chegada. A metodologia proposta consiste, numa primeira fase, na modelação desagregada dos diversos componentes horários, nomeadamente, partida, chegada e critério de determinação da proporção de cada uma das componentes. De seguida, serão agregadas as componentes, por forma a determinar a preferência horária de cada **O&D**. Por fim, será apresentado um método para determinar a percentagem de procura estimada caso se trate de um **O&D** servido por um **Itinerário** de ligação.

#### 3.1.1 Modelar Horário de Partida

Considerando a forma da função de preferência horária nos trabalhos de (Jacobs et al., 2012) e (Kuji Urata and Lidasan, 1997), onde os autores para modelar a procura total agregada, sugerem uma curva com dois picos de procura correspondendo às 9:00, no período da manhã e 18:00, no período da tarde, em horas locais. Seguindo essa sugestão, ajustou-se uma função constituída pela soma de duas curvas gaussianas, centradas nas 9:00 e 18:00, ajustando para horário **UTC**. Independentemente do objetivo da viagem, assume-se como pressuposto que em todos os segmentos de tráfego (negócios, lazer, ético), os passageiros pretendem passar o máximo tempo possível no destino, logo, escolhem os horários em função do sentido da viagem. Assim, considera-se como pressuposto que, quando se trata de um voo **Outbound**, a maioria dos passageiros prefere viajar no período da manhã, modelado pela curva gaussiana centrada nas 9:00 em horário local. Caso se trate da escolha de um voo **Inbound**, a preferência dos passageiros recai sobretudo para o período da tarde, modelado pela curva gaussiana centrada nas 18:00 em horário local. Sempre que se verifique uma diferença horária entre a hora local do aeroporto e o horário em **UTC**, haverá lugar a ajustes em conformidade, fazendo com que as curvas

gaussianas passem a estar centradas para a hora convertida em UTC.

Para salvaguardar que o modelo proposto reflete o sentido da viagem, utilizam-se os pesos dos POC (da origem e do destino) para determinar o desvio padrão de cada uma das curvas gaussianas. Assim, o desvio padrão associado à curva do período da manhã é determinado por,

$$\sigma_1 = \exp(1 - 2 \cdot \text{POC}_O) \times 2 \quad (3.1)$$

Para o cálculo do desvio padrão associado à curva do período da tarde usa-se uma fórmula semelhante

$$\sigma_2 = \exp(1 - 2 \cdot \text{POC}_D) \times 2 \quad (3.2)$$

Sejam:

- $f_1(x)$ ,  $x \in \{\text{slots disponíveis no aeroporto}\}$ , a função "discretizada" que representa a preferência horária associada ao período da manhã, obtida através da função densidade de probabilidade da gaussiana  $(\mu_1, \sigma_1)$ ;
- $f_2(x)$ ,  $x \in \{\text{slots disponíveis no aeroporto}\}$ , a função "discretizada" que representa a preferência horária associada ao período da tarde, obtida através da função densidade de probabilidade da gaussiana  $(\mu_2, \sigma_2)$ ;
- $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ ,  $x \in \{\text{slots disponíveis no aeroporto}\}$ , a função densidade "discretizada" que modela a preferência de passageiros pelo horário de partida.

Note-se que, sendo o domínio destas funções um domínio discreto, procedeu-se à standardização dos valores de  $f(x)$ , dividindo cada um por  $\sum f(x) \quad \forall x \in \{\text{slots disponíveis}\}$  obtendo por fim o valor da procura estimada por slot  $x$  a partir do potencial de procura média diária (ver tabela 2.6).

$$\text{Estim. Proc.}(x) = \text{Potencial mercado} \cdot \frac{f(x)}{\sum f(x)} \quad \forall x \in \{\text{slots disponíveis}\} \quad (3.3)$$

Como exemplo, considere-se o potencial de procura médio diário do O&D não direcional NR4-CT2 de 2694 passageiros, (ver tabela 2.6), significa que a estimativa para os O&D direcionais é de 1347 passageiros para NR4-CT2 e CT2-NR4.

Na figura 3.1 está representada a preferência horária no O&D direcional NR4-CT2. Como o peso das vendas do POC NR4 é de 39% (ver tabela 2.7), com desvios padrões  $\sigma_1 = 2.492$  e  $\sigma_2 = 1.605$ , o tráfego no O&D direcional NR4-CT2 servirá maioritariamente o sentido **Inbound**, existindo assim uma maior concentração das preferências em torno das 18:00.

Na figura 3.2 está representada a preferência horária no O&D direcional CT2-NR4. Como o peso das vendas do POC CT2 de 61% (ver tabela 2.7), com desvios padrões  $\sigma_1 = 1.605$  e  $\sigma_2 = 2.492$ , o tráfego no O&D direcional CT2-NR4 servirá maioritariamente o sentido **Outbound**, existindo assim uma maior concentração das preferências em torno das 9:00.

### 3.1.2 Modelar Horário de Chegada

Assumindo o pressuposto de que os passageiros pretendem passar o máximo tempo possível no destino, considera-se que a função de modelação do horário de chegada é tendencialmente decrescente ao longo do tempo. Considera-se que a preferência em termos do horário de chegada tem o seu ponto mais alto entre uma hora antes e uma hora depois do período de maior procura identificado na modelação da manhã para a preferência horária de partida (9h00 em hora local). Como a abertura dos aeroportos acontece genericamente muito antes do período de maior procura, inicialmente a curva é crescente desde a abertura do aeroporto até atingir o seu pico entre as 8h00 e 10h00 em hora local. Após as 10h00 torna-se

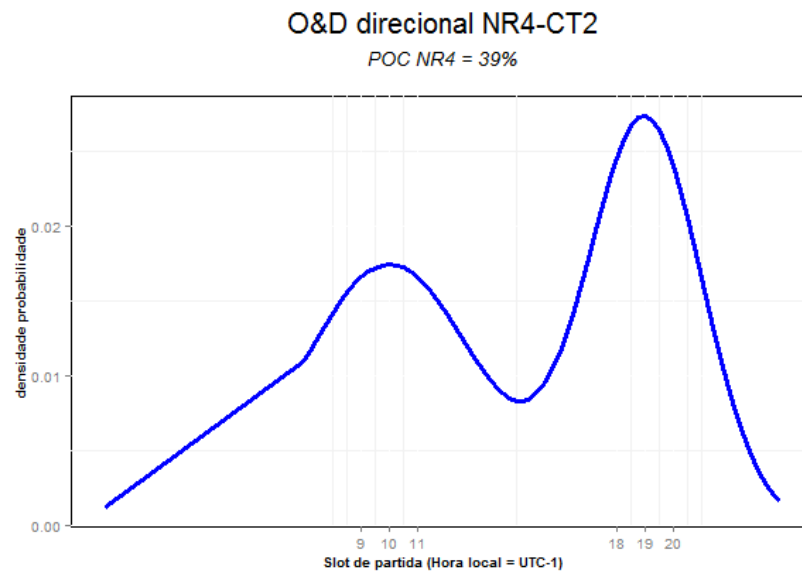


Figura 3.1: Exemplo para o O&D NR4-CT2 com a estimativa de procura maioritariamente concentrada no período da tarde

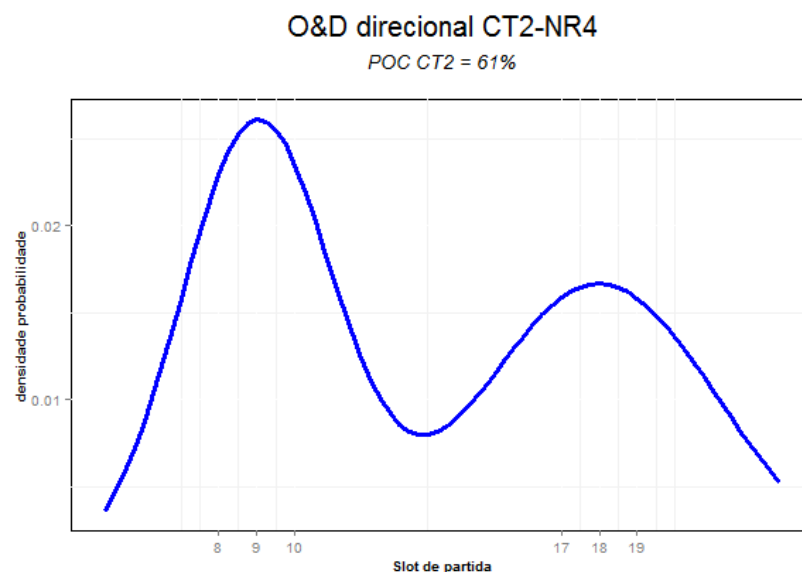


Figura 3.2: Exemplo para o O&D CT2-NR4 com a estimativa de procura maioritariamente concentrada no período da manhã

decrecente até uma hora antes do período de maior procura identificado na modelação de preferência de partida da tarde, passando nessa altura a ser constante até uma hora depois do período (19h00 em hora local). Por fim, até à hora de fecho do aeroporto volta a ser decrescente com um declive muito maior com o objetivo de refletir a menor preferência dos passageiros por chegadas tardias ao destino, já que dessa forma ficam com menos tempo para desfrutar do destino. A figura 3.3 mostra um exemplo de modelação da preferência horária no horário de chegada.

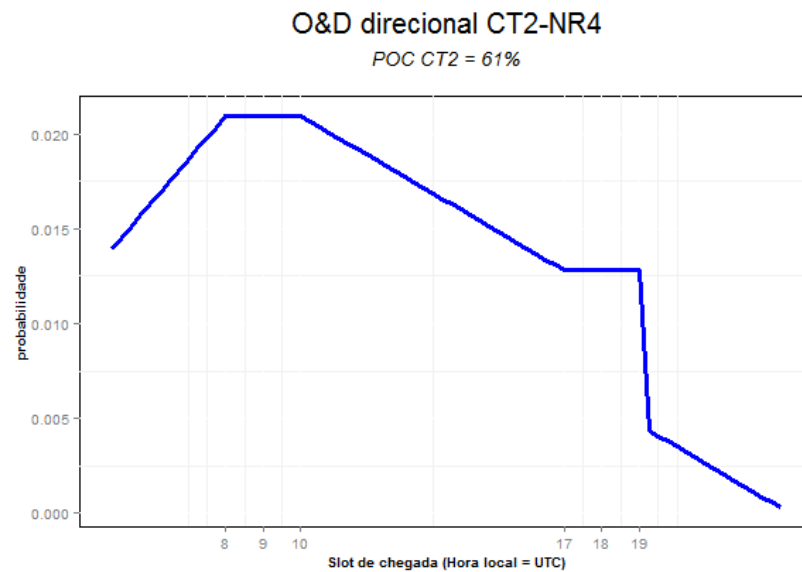


Figura 3.3: Exemplo de modelação da preferência horária de chegada para o O&D CT2-NR4

### 3.1.3 Preferência horária agregada

O modelo de preferência horária agregada resulta da combinação percentual de cada uma das duas funções anteriores. O critério usado para determinar o peso dado às funções de partida e chegada depende do tempo de viagem direto entre o par de aeroportos. O peso atribuído à função que modela a preferência de chegada varia entre um peso mínimo de 30% e máximo de 70%, em que o peso efetivo a atribuir em cada O&D é determinado por uma função distribuição logística com parâmetro de localização no valor correspondente a 3 horas de voo, tal como representado na figura 3.4.

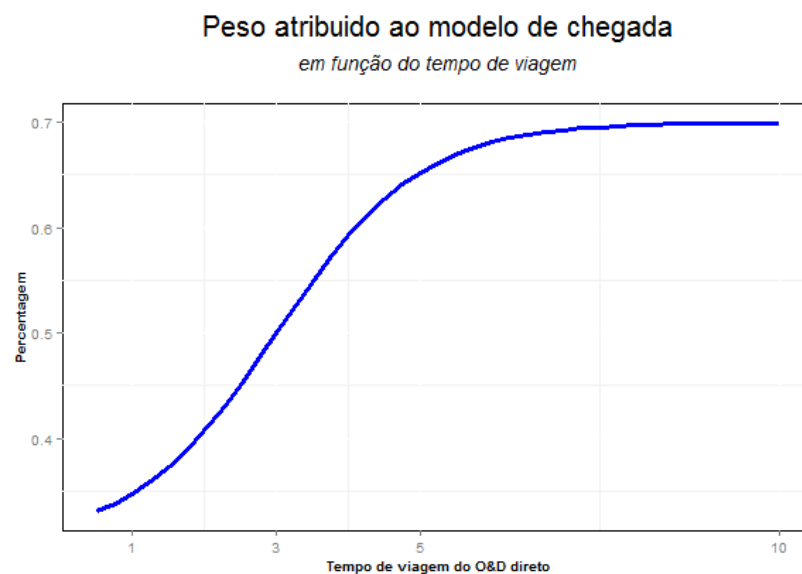


Figura 3.4: Função logística com localização nas três horas de voo, usada para determinar o peso a atribuir a cada uma das funções de preferência de partida e chegada

### 3.2 Tipo de serviço

Durante o processo de escolha dos itinerários, o tempo de viagem é um dos atributos mais relevantes na avaliação das diversas alternativas. Os itinerários diretos são muito mais apelativos e os que conseguem atrair a quase totalidade dos passageiros potenciais. Quando um determinado O&D não é servido por itinerários diretos, quanto menor o tempo total de viagem dos itinerários que oferecem serviços de ligação, maior a quota de mercado que consegue captar.

Considere-se o exemplo representado na figura 3.5 para ilustrar o método proposto de distribuição de procura num O&D sem serviço direto. Os passageiros que pretendam viajar no O&D OE4-NR1 têm à sua disposição um Itinerário com escala no aeroporto BST, permitindo fazer a viagem em 9:00, ou com a companhia aérea HH, que de acordo com o planeamento de voos, oferece um serviço menos competitivo que a concorrente, na medida em que o Itinerário tem um tempo de viagem de 11:30, sendo considerado menos apelativo em termos de preferência dos passageiros.

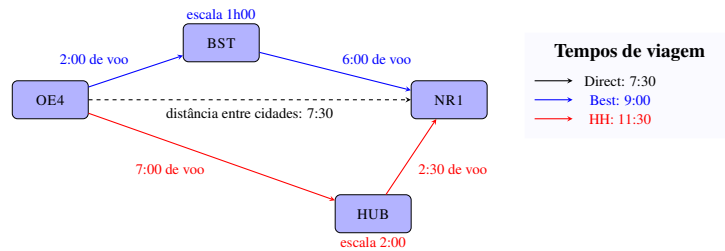


Figura 3.5: Exemplo de O&D OE4-NR1 sem serviço direto. Itinerário OE4-BST-NR1 com 9:00 e OE4-HUB-NR1 com 11:30 de tempo total de viagem

A estimativa da procura potencial máxima no O&D OE4-NR1 oferecida pela companhia aérea HH, será modelada recorrendo a uma função  $f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$  em que o parâmetro  $\lambda$  é calculado pela equação 3.4, que representa o rácio em termos de número de horas de voo do Itinerário direto e o melhor serviço possível.

$$\lambda = \frac{\text{distância em horas entre cidades}}{\text{tempo de voo melhor ligação}} \quad (3.4)$$

Assim, a estimativa de procura associada ao Itinerário oferecido pela companhia aérea HH, será dada pela equação 3.5, em que  $t$  representa a diferença entre o tempo de voo melhor ligação oferecida e a oferta da companhia aérea.

$$\text{proc}_t = \lambda \exp(-\lambda t) \times \text{estimativa procura (slot)} \quad (3.5)$$

No exemplo da figura 3.5 a distância em horas entre cidades é de 7:30, no entanto não havendo serviço direto de nenhuma companhia aérea para o O&D OE4-NR1 e a melhor ligação possível tem um tempo total de viagem de 9:00, aplicando a equação 3.4, chegamos a um valor  $\lambda = 0.8333$ , que será aplicado à função representada na figura 3.6. Para a companhia aérea HH, como o seu itinerário tem mais 2:30 que o melhor serviço, a estimativa de procura potencial máxima para esse itinerário será determinado pelo fator multiplicativo da procura. Para o exemplo apresentado, a procura será dada por,

$$\text{proc}_{2.5} = 0.833 \exp(-0.833 * 2.5) \times \text{estimativa procura (slot)} \quad (3.6)$$

$$\text{proc}_{2.5} = 0.103 * \text{estimativa procura (slot)} \quad (3.7)$$

Quanto menor for a diferença de duração para o melhor serviço de um determinado O&D, maior o potencial de procura atribuído ao itinerário.

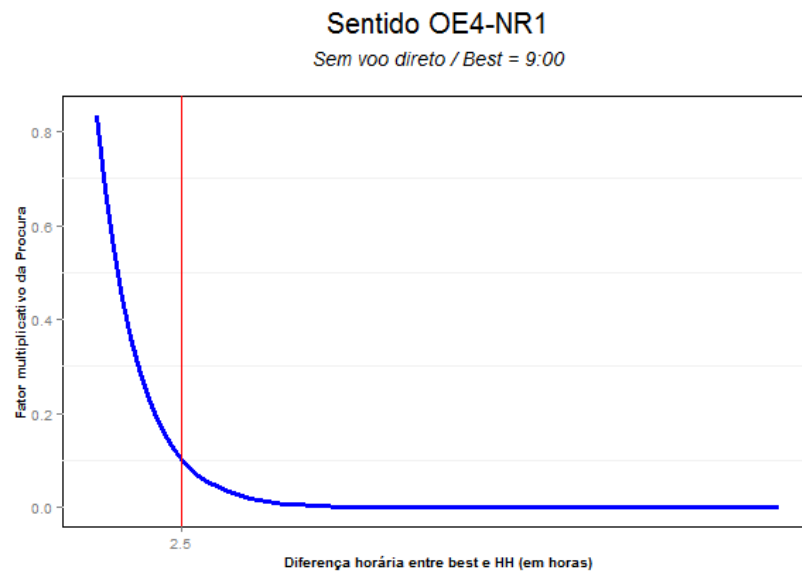


Figura 3.6: Exemplo do O&D OE4-NR1: Fator multiplicativo da procura como função da diferença do tempo total de voo para o itinerário com melhor serviço

### 3.3 Adicional de Procura

A preferência horária dos passageiros ao longo do dia está expressa em intervalos de 15 minutos. Apesar do valor atribuído a cada par de slots refletir a real intenção dos passageiros, considere-se para efeitos desta dissertação, a existência de um intervalo temporal de 30 minutos, em que uma parte dos passageiros se encontra disponível para trocar de slot. Assim, quando a companhia aérea seleciona um determinado O&D/slot, conseguirá captar 25% dos passageiros dos slots de  $\pm 15$  minutos e 12.5% do número de passageiros dos slots de  $\pm 30$  minutos.

Na figura 3.7 encontra-se ilustrado um exemplo do O&D CT1-CT2, em que a companhia aérea decide operar a partida às 10h15 de CT1 com destino a CT2 e horário de chegada às 11h15.

#### Procura O&D CT1-CT2

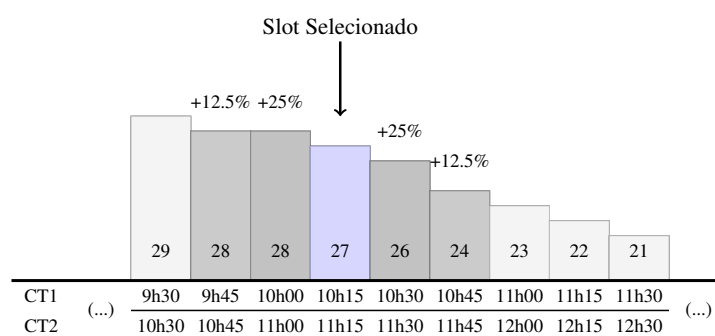


Figura 3.7: Escolha de slot CT1 10h15 - CT2 11h15 gera adicional de procura dos slots mais próximos

Segundo o exemplo ilustrado, existem 27 passageiros que preferem esse horário, no entanto, uma parte dos passageiros nos O&D/slots com preferência de partida às 9h45 (28 passageiros), 10h00 (28 passageiros), 10h30 (26 passageiros) e 10h45 (24 passageiros), devem ser contabilizados como adicional de procura para o voo em questão, na medida em que se encontram no intervalo temporal de  $\pm 30$  minutos do horário selecionado pela companhia aérea.

Considera-se como adicional de procura  $(28 + 26) * 0.25 + (28 + 24) * 0.125 = 20$ . Desta forma, a companhia aérea deve contabilizar  $27 + 20 = 47$  como potencial de procura total.

### 3.4 Aplicação ao caso de estudo

O processo de simulação da escolha dos passageiros, que resulta da aplicação da metodologia apresentada, encontra-se dividido em três fases resolvidas de forma sequencial.

#### 3.4.1 Gerar Itinerários Direcionais

O potencial de procura médio diária por O&D (ver matriz 2.6) representa o número total de passageiros em ambos os sentidos, sendo necessário dividir o total de passageiros por forma a obter o potencial de procura direcional médio diário por O&D. Por exemplo, o potencial de procura médio não direcional do O&D NR1-CT1 é de 3604 passageiros, que se divide em 1802 NR1-CT1 passageiros potenciais médios diários (direcionais) e 1802 passageiros CT1-NR1 (ver 3.1).

No caso de estudo apresentado existem 23 aeroportos, o que significa que existem 506 O&D direcionais, no entanto, dada a configuração geográfica da rede e a não admissibilidade de transportar tráfego entre O&D da mesma zona geográfica (exceto Centro), obriga à exclusão do potencial de tráfego, por exemplo entre SL4-SL1. Nesse sentido, a lista final será composta por 426 O&D direcionais de zonas geográficas diferentes (mais intra regional no Centro). Na tabela 3.1 está representado um excerto do output, contendo os 10 primeiros elementos dessa lista.

Tabela 3.1: Lista de O&D direcional admissíveis com informação de potencial de mercado e peso do POC de origem

origem	destino	procura	peso POC
NR1	CT1	1802	0.62
CT1	NR1	1802	0.38
NR1	CT2	2404	0.43
CT2	NR1	2404	0.57
NR1	CT3	618	0.53
CT3	NR1	618	0.47
NR1	SL1	2232	0.62
SL1	NR1	2232	0.38
NR1	SL2	2354	0.38
SL2	NR1	2354	0.62
(...)	(...)	(...)	(...)

#### 3.4.2 Modelar procura por horário de chegada e partida

A segunda fase tem como objetivo distribuir a procura potencial diária direcional por O&D ao longo do dia, utilizando os critérios de preferência horária de partida e chegada ao longo do período de funcionamento de cada aeroporto, divididos em períodos de 15 minutos.

No final desta fase, a lista completa de O&D direcionais por slot é composta por 31840 O&D / Slot, sendo que na perspetiva da companhia aérea, 9505 O&D / Slot correspondem a tráfego local e 22335 correspondem a tráfego de ligação.

#### 3.4.3 Determinar pares de slots

O terceiro sub-processo tem como objetivo determinar os pares de slots admissíveis, considerando período de funcionamento dos aeroportos e tempos de voos entre cada aeroporto. Nesta fase apenas

serão objeto de análise os **O&D / Slot** correspondentes ao tráfego local. A determinação dos potenciais de tráfego dos **O&D / Slot** de ligação implicam o conhecimento dos tempos de conexão no **Hub**, nesse sentido serão considerados apenas numa fase mais adiantada do processo.

Saliente-se o facto do modelo de previsão proposto permitir captar a essência da procura aérea, na medida em que voos de longa duração têm maior concentração de preferências por partidas à noite, tal como exemplificado no gráfico 3.8.

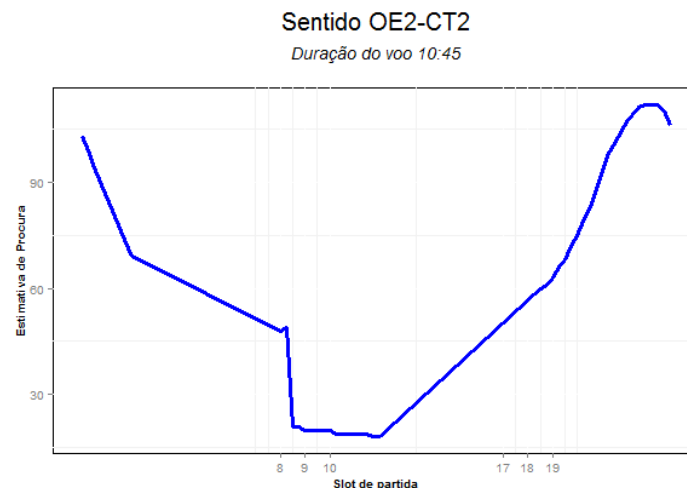


Figura 3.8: Exemplo da distribuição de procura para voos de longa duração, com maior concentração de procura para chegadas no período da manhã

Enquanto voos de curta duração apresentam maior concentração de procura ao longo do dia, como apresentado no gráfico 3.9.

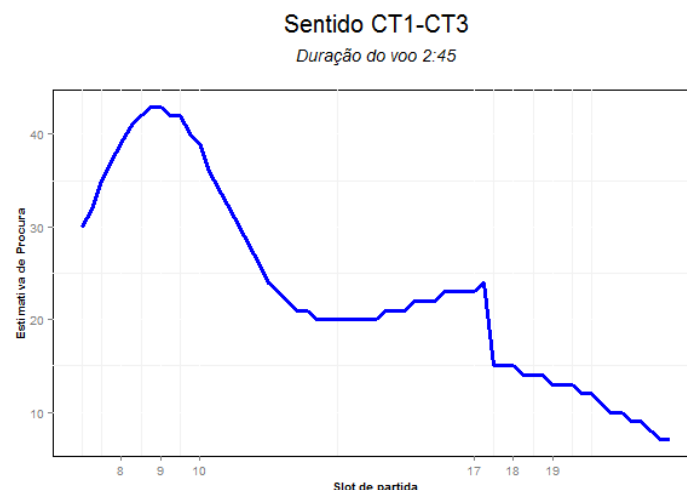


Figura 3.9: Exemplo da distribuição de procura para voos de curta duração, com maior concentração de procura para partidas e chegadas ao longo do dia



## Capítulo 4

# Algoritmo Genético

Tendo em consideração as características do problema e a metodologia de estimação da procura abordadas nos capítulos anteriores, introduz-se em seguida uma metodologia de resolução baseada em técnicas heurísticas para o problema de **desenho de rede**, mais concretamente, a aplicação de um algoritmo genético ao problema apresentado no caso de estudo.

Os algoritmos genéticos são técnicas heurísticas que pertencem ao conjunto de algoritmos evolutivos inspirados na biologia, mais concretamente na teoria darwinista de seleção natural. Os algoritmos genéticos foram introduzidos por (Holland, 1975), sendo essencialmente algoritmos de pesquisa que recorrem aos princípios básicos da genética e hereditariedade. O processo iterativo pode ser sintetizado da seguinte forma: cada possível solução do problema é designada por cromossoma, sendo definida através de um método de codificação. No início do processo são definidos um conjunto de cromossomas, selecionados de forma aleatória ou eventualmente por implantação de soluções determinadas por qualquer outra forma, que se designa por *população inicial*. A cada iteração são utilizados *operadores genéticos* que permitem gerar novos cromossomas, seja por via de cruzamentos ou mutações genéticas dos elementos que constituem a população atual. Desta forma os novos cromossomas gerados, partilham a genética dos seus progenitores, sendo avaliados de acordo com a sua aptidão. Ao longo do processo, o objetivo do algoritmo genético está relacionado com a evolução da qualidade dos elementos que constituem a população, nesse sentido, o critério de escolha dos cromossomas que integram a população seguinte resulta da nova geração de cromossoma, por substituição dos  $r$  cromossomas com menor aptidão da população anterior. A cada iteração a população vai sendo aperfeiçoada até se atingir um critério de paragem pré-definido. No final do processo é escolhida a solução que apresenta maior aptidão de entre o conjunto de elementos da população.

Para a correta aplicação de um algoritmo genético, existem dois aspetos de elevada importância, nomeadamente, a **codificação do problema** e o critério de utilização dos **operadores genéticos**. A codificação do problema estabelece a relação entre o algoritmo genético e o espaço das soluções do problema em estudo, permitindo responder a três necessidades vitais, nomeadamente, a agilidade, abrangência da pesquisa e qualidade das possíveis soluções encontradas.

No que respeita aos operadores genéticos, salienta-se a importância de encontrar uma relação de utilização adequada entre os operadores de cruzamento e mutação, na medida em que cada um tem uma função específica no processo evolutivo. O operador de **cruzamento** tem como principal função aperfeiçoar as soluções, convergindo a sua pesquisa numa partição específica do espaço das soluções. Uma utilização intensiva deste operador pode levar à redução de diversidade dos cromossomas da população de forma prematura, aumentando o risco de convergência do algoritmo para um ótimo local. O operador de mutação permite uma maior exploração do espaço de pesquisa, aumentando a diversidade dos elementos da população.

Neste capítulo será descrito o método de aplicação de um algoritmo genético ao problema de desenho de rede, com exemplos de construção das diversas componentes da heurística, mais concretamente, a codificação do problema, questões relacionadas com a população, função aptidão, operadores genéticos e critério de paragem.

## 4.1 Método

A aplicação de um algoritmo genético ao subproblema de *desenho de rede* pretende ser um suporte à decisão no que respeita a duas questões centrais. A primeira está relacionada com a identificação do número e localização de hub's melhor encontrado para a rede, enquanto a segunda diz respeito à construção de uma boa solução de rede em termos do número de passageiros potenciais, conectividade de rede e produtividade da frota.

Sendo o caso de estudo composto por três potenciais localizações de HUB's, significa que existem sete cenários possíveis para a questão da localização e número de Hub's, tal como identificado na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tabela de cenários

cenário	nº Hub(s)	Hub(s)
1	1	CT1
2	1	CT2
3	1	CT3
4	2	CT1 + CT2
5	2	CT1 + CT3
6	2	CT2 + CT3
7	3	CT1 + CT2 + CT3

Cada cromossoma constitui uma potencial solução de rede, refletindo as características genéticas do respetivo cenário que representa em termos de localização e número de Hub's. Por exemplo, os cromossomas do cenário 3 representam possíveis soluções com 1 Hub, localizados em CT3, enquanto os cromossomas do cenário 4, representam possíveis soluções com 2 Hub's localizados em CT1 e CT2.

A utilização do operador genético de cruzamento entre dois cromossomas representativos dos cenários 3 e 4, faz com que o novo cromossoma gerado perca a identidade genética dos seus progenitores, na medida em que a nova solução deixa de codificar os cenários dos seus progenitores, passando a ter identidade genética do cenário 5,6 ou 7.

Caso não seja acautelada esta situação, no limite as soluções convergem para cromossomas com identidade genética do cenário 7, não explorando convenientemente todo o espaço de soluções.

De forma a garantir uma boa pesquisa do espaço de soluções, mantendo a característica genética de cada cenário no decorrer de cada nova geração, o método de resolução proposto nesta dissertação será constituída por duas fases. Na primeira fase serão definidos sete processos paralelos, sendo cada um deles representativo de um dos cenários, com o respetivo número e localização de Hub's. Cada partição terá como função a pesquisa de uma parte do espaço de soluções em função dos cenários dos números e localizações de Hub's.

Esta abordagem assenta em duas premissas base. A primeira diz respeito à constituição da população inicial em cada partição, que será composta por 50 elementos com a mesma identidade genética, gerados de forma aleatória e respeitando as características genéticas. A segunda, diz respeito à utilização dos operadores genéticos no decorrer do processo iterativo, que deve garantir que os novos cromossomas não alteram as características genética do cenário em termos de número e localização de Hub's referente a cada partição. Por exemplo, no decorrer do processo iterativo da partição representativa do cenário 7, os cromossomas que compõem a população devem representar soluções com três Hub's.

Na segunda fase serão selecionadas as melhores soluções de cada uma das partições, em termos de número de passageiros potenciais, conectividade de rede e produtividade da frota para posterior comparação e escolha da solução final.

## 4.2 Codificação

O método de codificação proposto nesta dissertação para resolver o problema de *desenho de rede*, altera a abordagem tipicamente usado pelas companhias aéreas (ver figura 1.6). Enquanto na abordagem tradicional, se divide o problema em subproblemas de menor dimensão resolvidos sequencialmente, sendo o input de cada subproblema, a solução do problema anterior, nesta dissertação evidencia-se a importância da afetação de frota e do sequenciamento de voos (*Tarefas*), que equivale à resolução do subproblema de **Afetação de rotação**, como aspeto central ao funcionamento do algoritmo, tal como apresentado na figura 4.1.

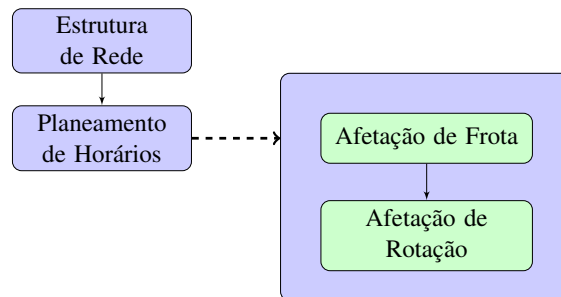


Figura 4.1: Processo de codificação aborda os subproblemas de *Afetação de frota e rotação*

Para cada avião, será gerado um sequenciamento de tarefas aleatórias e admissível, designado por gene. Posteriormente, cada cromossoma representará uma solução admissível para o problema, sendo composta pelo conjunto de genes gerados aleatoriamente para cada avião da frota da companhia aérea.

A admissibilidade dos genes é em grande medida definida pelo tipo de *Estrutura de rede* que a companhia aérea escolhe. Considerando a estrutura *Hub-and-Spoke*, uma regra para garantir admissibilidade dos genes, obriga a que se escolha um destino *Hub*, sempre que a origem é um aeroporto não *Hub*.

Cada tipo de avião tem um conjunto de características que devem ser levadas em conta durante o sequenciamento de tarefas, assim, a abordagem utilizada na codificação do problema que responde ao subproblema de *Afetação de frota*, segmenta as rotas em função do tempo de viagem, garantindo que a escolha de tarefas será efetuada a partir do subgrupo de rotas e em função do tipo de avião.

### 4.2.1 Gene

Tal como referido anteriormente, cada gene é composto por uma sequência de *Tarefas*, representando a rotação de um avião da frota. Assim, o algoritmo pesquisa no espaço de soluções, gerando sequenciamentos de acordo com um conjunto de pressupostos.

De forma a ser considerado um sequenciamento de tarefas admissível, determina-se que cada rotação de aviões têm início e fim num *Hub* e a sua rotação tem de estar completa no período máximo de 24 horas (acautelando a questão do *TAT* necessário para cada tipo de avião), sendo o destino da última tarefa, o mesmo que a origem da primeira.

Relativamente ao espaço de pesquisa das tarefas, para ser considerado admissível o sequenciamento deve respeitar três critérios. O primeiro determina que a tarefa tem de pertencer ao subgrupo pré-determinado pelo critério de segmentação das rotas em função do tempo de voo. O segundo critério está relacionado com a questão temporal do problema. Para ser considerado admissível, a escolha de tarefas deve garantir que o horário de partida é posterior à chegada da tarefa anterior, mais o *TAT* do tipo de avião para o qual está a ser gerada a sequência. O terceiro critério determina que quando a origem é um aeroporto não *Hub*, o destino da tarefa a selecionar é obrigatoriamente um aeroporto *Hub*.

### Segmentação de voos

Tendo em consideração o tipo de frota à disposição da companhia aérea, a segmentação aplicada ao problema define três grupos de afetação possíveis de aviões às rotas. Além do limite natural definido pela autonomia de cada tipo de avião, por questões de simplificação considera-se também um limite mínimo por forma a garantir que cada rota só seja operada apenas por um tipo de avião.

Tipicamente os aviões com maior autonomia apresentam uma maior capacidade e maior consumo de combustível, sendo desta forma mais eficiente quando afetos a rotas de longa duração. Assim, considera-se que o pressuposto de não permitir que os aviões com grande autonomia sejam afetos a rotas de curta duração gera naturalmente um aumento de eficiência no processo de sequenciamento de tarefas.

Assim, para o caso de estudo apresentado, a segmentação de rotas define-se da seguinte forma:

$$\text{grupo} = \begin{cases} 1, & \text{tempo voo} \geq 6 \\ 2, & 3 < \text{tempo voo} < 6 \\ 3, & \text{tempo voo} \leq 3 \end{cases}$$

### Sequenciamento de tarefas

O exemplo de sequenciamento de tarefas apresentado na figura 4.2 é gerado através de um processo iterativo definido em duas fases. A primeira fase permite **escolher a tarefa inicial** de entre o conjunto de tarefas com origem num **Hub**, não havendo restrição de horários nesta fase, o processo incorpora dois métodos heurísticos. O método "**normal**" recorre a uma escolha aleatória simples, enquanto que o método heurístico denominado "**greedy**" seleciona a tarefa inicial de entre um subconjunto das cinco melhores tarefas em cada **O&D** em termos da procura potencial. Na figura 4.2a encontra-se exemplificada a geração da primeira fase do processo.

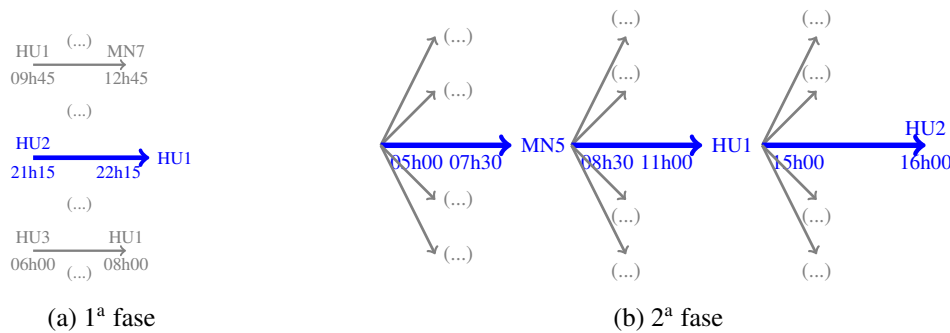


Figura 4.2: Exemplo do processo de sequenciamento de tarefas para um avião do tipo 3

A segunda fase do processo pretende **completar o sequenciamento**, selecionando aleatoriamente tarefas, recorrendo a um de três métodos heurísticos para completar o sequenciamento. O método "**normal**" seleciona aleatoriamente os slot's disponíveis depois de hora chegada + TAT. Outro método disponível designa-se por "**greedy**" e tem como foco a introdução de tarefas com maior potencial de procura. Utilizando o mesmo espaço de pesquisa que o método anterior, selecionando o slot com maior potencial de procura nesse intervalo. Por fim, o método "**fast**" tem como foco maximizar a utilização dos aviões, escolhendo o slot mais rápido, escolha de slot = Hora de chegada + TAT. Na figura 4.2b encontra-se exemplificada a sequência de iterações necessárias para completar o sequenciamento.

Consideram-se sequenciamentos admissíveis apenas os casos que garantam equilíbrio entre ambos os sentidos das rotas. Desta forma, o algoritmo de sequenciamento de tarefas incorpora dois esquemas de rotação tal como apresentado na figura 4.3.

Sempre que possível, o esquema de rotação é escolhido de forma aleatória, repetindo o processo selecionado até atingir o critério de paragem (24 horas). O **esquema de rotação simples** representado na figura 4.3a completa o ciclo a cada duas tarefas, utilizando apenas um **Hub**, enquanto que o **esquema de rotação duplo** representado na figura 4.3b completa o ciclo a cada quatro voos, utilizando dois **Hub**'s. Tendo em conta as características apresentadas para cada esquema de rotação, o ciclo de rotação duplo apenas pode ser considerado para a geração de sequenciamentos para os cenários 4 a 7.

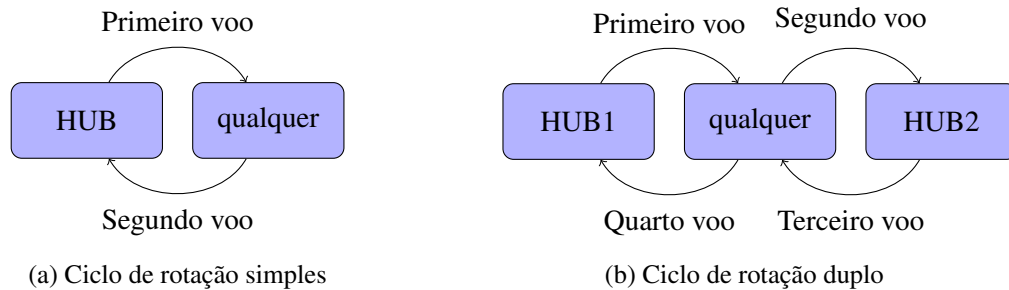


Figura 4.3: Duas metodologias de ciclos de sequenciamento de tarefas para gerar Genes do algoritmo genético

#### 4.2.2 Cromossoma

Após garantir admissibilidade operacional de cada gene, através do sequenciamento de **Tarefas**, os cromossomas são constituídos pelo conjunto de genes gerados aleatoriamente para cada avião, representando dessa forma uma solução admissível para o problema de *desenho de rede*. Na figura 4.4 encontra-se representado um exemplo de codificação de um cromossoma. O número de elementos é determinado pela quantidade de aviões disponível, sendo o posicionamento de cada elemento fixo.

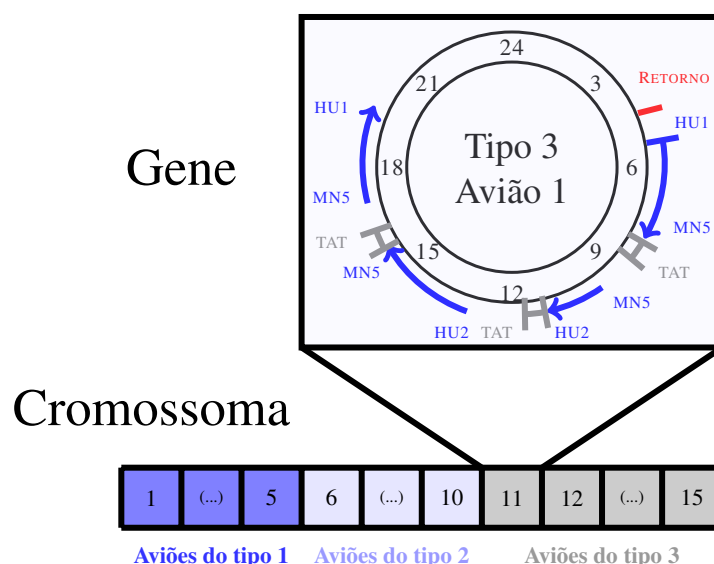


Figura 4.4: Representação de um cromossoma com 15 elementos, com ampliação de um gene

No caso de estudo apresentado, considera-se uma frota composta por 15 aviões divididos em três tipos. Assim, cada cromossoma será composto por 15 elementos, caracterizados pela ordem de genes do cromossoma, que reflete os diversos tipos de avião. Os primeiros cinco genes representam os sequenciamentos dos aviões do tipo 1, que refletem o grupo de rotas com tempos de voo maiores ou iguais a 6 horas. Entre o quinto e o décimo elementos de cada cromossoma, encontram-se os genes que representam os sequenciamentos dos aviões do tipo 2, refletindo o grupo de rotas com tempos de

voo entre as três e as seis horas de voo. Por fim, os últimos cinco elementos de cada cromossoma, representam o grupo de aviões do tipo 3, refletindo o sequenciamento de tarefas do grupo de rotas com tempos de voo menores ou iguais a três horas.

Na tabela 4.2 encontra-se representado um cromossoma que reflete uma solução de rede para o cenário 1, correspondendo a 1 hub localizado em CT1. Cada cromossoma é composto por um conjunto de características de identificação e aptidão. As características de identificação compreendem o **grupo**, que representa o tipo de avião utilizado para a rotação e consequentemente o grupo de rotas que compõem o gene, a **posição** que reflete a identidade genética do cromossoma e o **percurso**, que identifica a sequencia de tarefas em cada gene. As características de aptidão compreendem o **tempo de voo**, que diz respeito ao total de horas de utilização do avião no respetivo sequenciamento, o **número de voos** utilizado no sequenciamento, o **número de hits**, que é a medida de conectividade do cromossoma, o **potencial de passageiros local**, referente ao tráfego potencial direto e **potencial de passageiros ligação**, referente ao tráfego potencial em O&D's de ligação no Hub. De referir que os potenciais de passageiros já consideram o adicional de procura referente ao tempo de indiferença apresentado na secção 3.3.

Tabela 4.2: Exemplo de cromossoma do cenário 1

grupo	posição	percurso	tempo_voo	n_voos	hits	local	ligação
1	CT1	321-1425	13.50	2	3	88	21
1	CT1	576-1715	14.00	2	6	161	115
1	CT1	649-1773	21.00	2	4	404	145
1	CT1	672-1758	21.00	2	3	133	95
1	CT1	942-2001	15.50	2	1	113	21
2	CT1	873-1925	7.50	2	1	106	6
2	CT1	714-1792	11.50	2	4	133	17
2	CT1	635-1717	9.00	2	3	227	2
2	CT1	855-1965-395-1488	19.00	4	6	187	168
2	CT1	412-1575-828-1864	17.50	4	9	206	84
3	CT1	171-1208-71-1179	11.00	4	9	228	119
3	CT1	540-1626-16-1113	7.00	4	7	127	158
3	CT1	58-1087-1003-2105	7.50	4	7	71	105
3	CT1	1042-2077-131-1237	11.00	4	8	189	89
3	CT1	65-1173-96-1144	11.00	4	7	177	27

O processo de geração de um cromossoma, encontra-se dividido em três fases sequenciais. A primeira diz respeito à criação dos genes individuais, sendo garantida a admissibilidade operacional do sequenciamento de tarefas. Na segunda fase cria-se o cromossoma, através da união de genes, sendo composto por 15 elementos, 5 genes de cada tipo de avião. Nesta fase, o cromossoma têm de cumprir três tipos de admissibilidade, identidade genética, limite máximo de 5 partidas e 5 chegadas por slot e diferença horária igual ou superior a 1 hora para rotas com o mesmo O&D. O critério da identidade genética é facilmente comprovada pelo número de Hub's aos quais os voos estão afetos, no exemplo do cromossoma representado na tabela 4.2, observa-se que a coluna **posição** apenas é composta dos um tipo de Hub (CT1), comprovando que o cromossoma codifica uma solução pertencente ao cenário 1, com um hub localizado em CT1. O limite máximo de utilização de cinco slots visa evitar os constrangimentos do Hub resultantes de excessiva concentração de voos num determinado slot, enquanto a diferença horária igual ou superior a 1 hora está relacionado com a qualidade da solução. Após garantidos todos os critérios de admissibilidade, a terceira fase diz respeito às características de aptidão dos cromossomas. O tempo de voo, número de voos efetuados e potencial de passageiros locais são calculados durante o processo de criação de genes, no entanto, para calcular o número de hits e potenciais passageiros de ligação, é necessário avaliar o cromossoma em termos da estrutura de bank. Na figura 4.5 encontra-se uma representação do cromossoma em termos de estrutura de bank. Por questões de simplificação o

cromossoma encontra-se representado em intervalos temporais de 1 hora, no entanto, a contagem de hits e potencial de passageiros de ligação é avaliada pela hora efetiva dos voos.

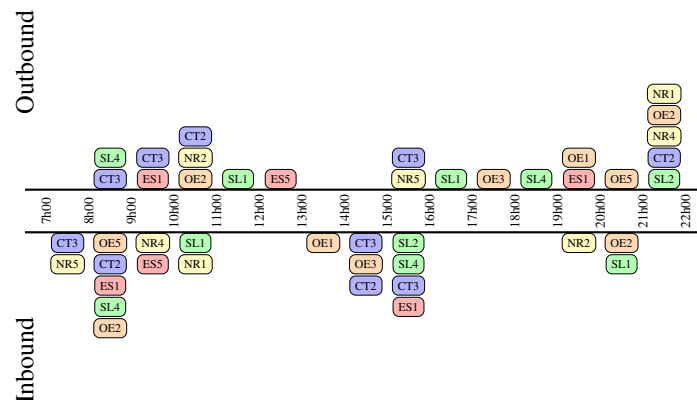


Figura 4.5: Exemplo de codificação de um cromossoma em termos de estrutura de bank

Em termos de avaliação da conectividade de rede, considera-se como número de hits a soma de voos outbound com horário de partida compreendido entre a hora de chegada dos voos inbound + 60 minutos e a chegada dos voos inbound + 240 minutos, desde que as regiões geográficas seja diferente entre voos de inbound e outbound.

### 4.3 População

A população é composta por um determinado número de cromossomas pré-determinado. Ao longo do processo, a população vai evoluindo através da seleção dos elementos mais aptos em cada iteração. A dimensão da população é muito importante para o processo evolutivo do algoritmo genético, na medida em que populações com um número reduzidos podem potenciar o risco de não cobrir eficientemente o espaço das soluções, enquanto que populações muito grandes podem provocar problemas de eficiência computacional.

Como um dos objetivos desta dissertação é a avaliação do número de *Hub's* numa determinada rede, a população inicial deve refletir a diversidade de alternativas que se pretende estudar.

#### 4.3.1 População Inicial

Serão criadas sete partições, referentes a cada um dos cenários de número e localização de *Hub's*, assim, cada partição será composta por 50 elementos com a mesma identidade genética, sendo gerada através do método de geração aleatória de cromossomas.

#### 4.3.2 Novas Gerações

O processo evolutivo que caracteriza o algoritmo genético, decorre do funcionamento dos operadores genéticos ao longo das iterações, pressupondo a substituição de alguns cromossomas da população. De forma a garantir alguma estabilidade evolutiva de convergência da população, propõe-se usar o critério de **Elitismo** em 6%, garantindo desse modo a manutenção em cada iteração dessa percentagem de cromossomas mais aptos para a geração seguinte.

Em cada iteração, ao utilizar os operadores genéticos, serão gerados 10 novos cromossomas através de cruzamentos, assim como um número variável de mutações. A evolução da população será feita pelo critério de **substituição incremental** que permite substituir apenas os 10 membros com menor aptidão da população pelos 10 novos cromossomas gerados.

O esquema de processo de evolução da população encontra-se esquematizado na figura 4.6.



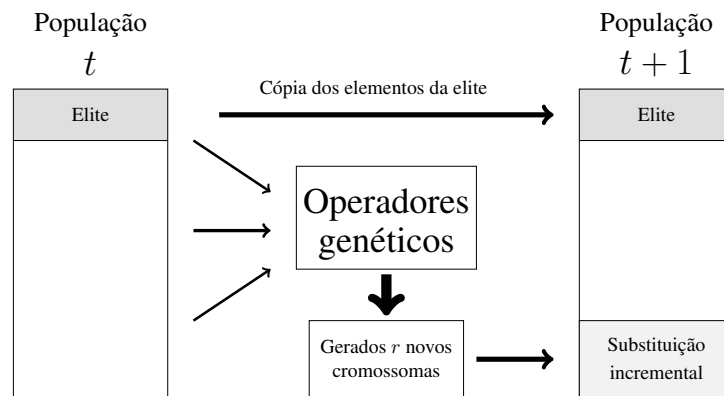


Figura 4.6: Exemplo da evolução da população no decorrer de uma iteração do algoritmo genético

## 4.4 Função Aptidão

As soluções serão avaliadas em termos de potencial de procura, conectividade de rede e produtividade de frota.

Em termos teóricos, o potencial de procura está positivamente relacionado tanto com a conectividade da rede, como com a produtividade da frota. Em termos de conectividade de rede, quanto maior o número de hits que uma rede oferece, maior a probabilidade de captar mais passageiros. Por outro lado, uma maior utilização da frota, aumenta o número de voos e consequentemente a probabilidade de captar mais passageiros para a rede.

No entanto, o mesmo não se pode dizer se avaliarmos a relação entre a conectividade de rede e a produtividade da frota. Até certo ponto podem estar positivamente relacionadas, mas no limite, as variáveis apresentam uma relação negativa entre si, na medida em que, o aumento da conectividade implica maiores tempos de espera para permitir ligação entre voos, reduzindo dessa forma a taxa de utilização da frota.

Neste sentido, é importante encontrar uma boa solução de rede que apresente resultados robustos e equilibrados em termos de potencial de procura, conectividade de rede e produtividade da frota.

Tal como referido anteriormente, a abordagem ao problema de *desenho de rede* seguida nesta dissertação evidencia a importância do sequenciamento de voos ([Tarefas](#)), como aspeto central no funcionamento do algoritmo genético. Assim, nesta fase do processo iterativo, são abordadas questões que fazendo a analogia para o método de resolução tradicionalmente usado pelas companhias aéreas, dizem respeito aos subproblemas de **planeamento de horários** e **estrutura de Bank**, tal como apresentado na figura 4.7.

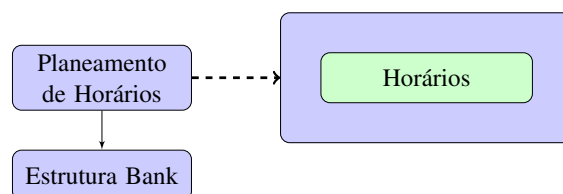


Figura 4.7: Processo de identificação da aptidão aborda os subproblemas de *Planeamento de Horários*, *Estrutura de Bank*

### 4.4.1 Critérios de avaliação da rede

Decorrente da modelação de procura em função da preferência horária dos passageiros, o primeiro critério de avaliação diz respeito ao número de **passageiros potenciais**, que resulta da soma dos potenciais de passageiros locais e de ligação. O segundo critério de avaliação mede a **conectividade**, em termos de número de hits que a rede permite criar. Para avaliar a conectividade, considera-se um



**MCT** de 60 minutos e um **MaxCT** de 240 minutos para identificar os voos outbound que se encontram no período temporal admissível para servir de conexão aos voos inbound, assim como a *direcionalidade* em termos de regiões geográficas dos voos inbound e outbound, sendo contabilizados como hit, todas as possibilidades de ligação que cumpram os critérios apresentados. O terceiro critério de avaliação está relacionado com a *produtividade da frota*, considerando para o efeito da dissertação a utilidade ajustada da frota. Esta pode ser calculada através da divisão entre a soma de horas de utilização dos aviões, pelo número de voos.

#### 4.4.2 Processo de avaliação

Tratando-se da aplicação de um algoritmo genético para o problema de *desenho de rede* numa companhia aérea com estrutura *Hub-and-Spoke*, a avaliação da aptidão dos cromossomas no decorrer do processo iterativo, será medida recorrendo a um critério de ponderação das diferentes métricas, de acordo com os valores constantes na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tabela de ponderações

Critério	Descrição	Ponderação
Potencial de Passageiros	Potencial de passageiros Locais e Ligação	50%
Conectividade da rede	Nº Hits	30%
Produtividade da Frota	Utilização Ajustada	20%

Como exemplo encontra-se representado na tabela 4.4, um excerto da população inicial referente ao cenário 5 (2 Hub's, localizados em CT1 e CT3), com o número do cromossoma e respetivos valores dos atributos considerados, potencial de passageiros, conectividade da rede e produtividade da frota.

Tabela 4.4: Exemplo de População Inicial do cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3)

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
1	2794	40	4.16	0.80
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
27	2375	22	4.83	0.65
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
19	1771	23	4.53	0.37
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
6	1620	16	4.95	0.36
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
21	1626	15	4.56	0.25
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
12	1656	8	4.55	0.19
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
32	1391	19	4.32	0.14

A determinação do **score** de cada cromossoma é feito recorrendo à posição relativa do valor de cada um dos atributos dos cromossomas na globalidade da população, sendo reavaliado para todos os elementos da população a cada iteração. Assim, numa primeira fase identificam-se os valores mínimos e máximos de cada atributo: Potencial de passageiros (min: 1391; max: 2794), Conectividade de rede (min: 8; max: 40) e Produtividade da frota (min:4.156; max:4.95). De seguida calcula-se a posição relativa de cada cromossoma para cada um dos atributos, tal como representado na equação 4.1,

$$\text{Pos\_rel}_{\text{crom}} = (\text{Valor}_{\text{crom}} - \min(\text{atributo})) / (\max(\text{atributo}) - \min(\text{atributo})) \quad (4.1)$$

exemplo:

Peso relativo do cromossoma 27 em termos de potencial de passageiros é de  $(2375 - 1391) / (2794 - 1391) = 0.7013542$ , em conectividade de rede é de  $(22 - 8) / (40 - 8) = 0.4375$  e produtividade de frota é de  $(4.83 - 4.156) / (4.95 - 4.156) = 0.8488665$ .

Aplicando a ponderação atribuída a cada critério, ao peso do cromossoma nos atributos correspondentes, chegamos ao valor do score,  $0.7013542 * 0.5 + 0.4375 * 0.3 + 0.8488665 * 0.2 = 0.65$ .

Por fim os cromossomas são ordenados por ordem decrescente de score, sendo que os 10 elementos com menor valor em cada iteração, serão substituídos pela nova geração que for criada com recurso ao operador de cruzamento.

Como os valores máximos e mínimos de cada atributo alteram a cada iteração, os *scores* de todos os cromossomas que transitam para a população da iteração seguinte são reavaliados de acordo com a sua nova posição relativa face aos novos valores mínimos e máximos da população. Esta particularidade pode fazer com que um cromossoma elegível para transitar para a população da iteração seguinte, mesmo que não tenha sofrido nenhuma mutação, possa apresentar um score diferente do que tinha na população anterior.

## 4.5 Operadores Genéticos

Tendo em conta o contexto apresentado, a utilização dos operadores genéticos durante o processo iterativo, deve oferecer dois tipos de garantias. Manutenção da identidade genética da população de cada partição e admissibilidade dos elementos da população.

### 4.5.1 Seleção e Reprodução

Do conjunto de 50 elementos que compõem a população, em cada iteração serão selecionados 10 pares de cromossomas aleatoriamente para servir de progenitores. De forma a conferir maior abrangência na pesquisa do espaço de soluções, o método de atribuição de probabilidades é também ele aleatório, podendo variar em cada iteração por um dos métodos apresentados e a sua respetiva probabilidade como consta na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Métodos de atribuição de probabilidades

Critério	Probabilidade
Valor do Score	35%
Inverso da Posição	30%
Uniforme	20%
Melhores e Piores	10%
Posição	5%

Quando os métodos de atribuição de probabilidades **valor do score** e **inverso da posição** são selecionados, existe uma maior probabilidade de escolha das melhores soluções da população, sendo que o método de **valor do Score** incorpora o *score* dos cromossomas como probabilidade de escolha dos elementos, enquanto o método **inverso da posição** utiliza a posição invertida. O método **uniforme** atribui a mesma probabilidade a cada um dos 50 elementos da população, enquanto o método **posição** atribui maior probabilidade de escolha aos cromossomas com menor score, em função da sua posição. Ao contrário dos restantes métodos apresentados, o método designado **melhores e piores** em vez de atribuir probabilidades de escolha a cada elemento, funciona como seleção direta dos elementos para

reproduzir, escolhendo os 10 elementos melhores e 10 piores.

Na tabela 4.6 é apresentado um exemplo de emparelhamento de cromossomas para o cenário 5 (2 Hub's com localização em CT1 e CT3).

Tabela 4.6: Exemplo de População Inicial do cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3)

emparelhamento	Cromossoma 1	Cromossoma 2
1	46	27
2	14	18
3	34	47
4	24	36
5	9	6
6	25	30
7	4	17
8	19	21
9	12	13
10	45	31

## 4.5.2 Cruzamento

Após seleção dos cromossomas progenitores, procede-se ao cruzamento com o intuito de gerar um novo cromossoma admissível que mantenha a identidade genética dos progenitores. As tabelas 4.7 e 4.8 mostram os cromossomas progenitores do emparelhamento 8 da tabela 4.6. Ambos os cromossomas apresentam aptidões semelhantes em termos de produtividade da frota (cromossoma 19: 4.53; cromossoma 21: 4.56), no entanto o cromossoma 19 apresenta melhores performances em termos de potencial de procura (cromossoma 19: 1771; cromossoma 21: 1626) e conectividade de rede (cromossoma 19: 23; cromossoma 21: 15), resultando num valor de score de 0.37 para o cromossoma 19 e 0.25 para o cromossoma 21 (ver tabela 4.4)

Tabela 4.7: Cromossoma 19 cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3)

grupo	posição	percurso	tempo_voo	n_voos	hits	local	ligação
1	CT1	751-4430	14.50	2	2	93	2
1	CT3	2070-4088	15.50	2	0	71	0
1	CT1	315-3354	13.50	2	1	84	15
1	CT3	2077-4019	15.50	2	2	52	5
1	CT3	2226-4239	16.50	2	0	40	0
2	CT1	982-4950	11.50	2	2	167	0
2	CT1	949-4980	11.50	2	0	163	0
2	CT3	2298-4452	10.00	2	1	87	43
2	CT3	2292-4335	7.00	2	4	148	10
2	CT3	1406-2898	10.50	2	1	50	1
3	CT3	2755-5120-998-5147	10.50	4	2	74	14
3	CT3	1276-124-2863-95	16.50	4	2	262	5
3	CT1	532-3976-1950-3863	10.50	4	3	130	2
3	CT3	2767-5067-1008-5156	10.50	4	1	79	60
3	CT1	36-1195-1279-1086	7.00	4	2	107	7
Aptidão:			4.53		23	1771	

Consideram-se dois tipos de cruzamento possíveis, escolhidos de forma aleatória. O **cruzamento simples**, representado na figura 4.8, seleciona um corte único aleatório, dentro das possibilidades que garantem a manutenção da identidade genética do novo cromossoma, fazendo com que os novos cromossomas tenham pelo menos um avião de cada tipo posicionado num dos Hub's do cenário em causa. No exemplo representado, os cruzamentos devem garantir que existe pelo menos um gene de cada

Tabela 4.8: Cromossoma 21 cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3)

grupo	posição	percurso	tempo_voo	n_voos	hits	local	ligação
1	CT3	1462-3025	20.00	2	1	176	1
1	CT3	1629-3286	14.50	2	0	148	0
1	CT3	1716-3443	18.50	2	1	0	0
1	CT1	943-4817	15.50	2	0	114	0
1	CT3	1808-3571	14.50	2	0	30	0
2	CT1	632-4093	9.00	2	0	224	0
2	CT3	1568-3153	9.50	2	0	22	0
2	CT3	1884-3759-1494-3175	18.00	4	2	103	0
2	CT1	834-4523	10.50	2	0	53	0
2	CT1	447-3637	7.00	2	0	129	0
3	CT3	1961-3874-509-3951	10.50	4	3	190	20
3	CT3	1304-1109-30-1188	7.00	4	3	109	19
3	CT1	113-1277-1147-1235	16.00	4	1	104	0
3	CT3	2775-5064-1003-5150	10.50	4	1	80	0
3	CT1	1045-5124-2734-5097	10.50	4	3	104	0
Aptidão:			4.56		15	1626	

tipo posicionado nos Hub's CT1 e CT3. O novo cromossoma será composto por uma parte de genes de cada um dos progenitores.

## Corte simples

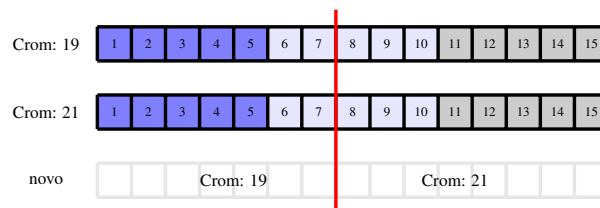


Figura 4.8: Exemplo de Cruzamento simples

Na tabela 4.9 encontra-se representado o novo cromossoma resultante do emparelhamento entre os cromossomas 19 e 21.

Tabela 4.9: Cromossoma 58 cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3)

grupo	posição	percurso	tempo_voo	n_voos	hits	local	ligação
1	CT1	751-4430	14.50	2	2	93	5
1	CT3	2070-4088	15.50	2	2	71	8
1	CT1	315-3354	13.50	2	0	84	1
1	CT3	2077-4019	15.50	2	0	52	6
1	CT3	2226-4239	16.50	2	0	40	0
2	CT1	982-4950	11.50	2	3	167	5
2	CT1	949-4980	11.50	2	1	163	0
2	CT3	1884-3759-1494-3175	18.00	4	2	103	0
2	CT1	834-4523	10.50	2	1	53	0
2	CT1	447-3637	7.00	2	1	129	0
3	CT3	1961-3874-509-3951	10.50	4	2	190	23
3	CT3	1304-1109-30-1188	7.00	4	2	109	24
3	CT1	113-1277-1147-1235	16.00	4	1	104	0
3	CT3	2775-5064-1003-5150	10.50	4	3	80	12
3	CT1	1045-5124-2734-5097	10.50	4	2	104	4
Aptidão:			4.49		22	1630	

O novo cromossoma foi gerado através de um cruzamento de corte simples entre os genes 7 e 8, herdando os primeiros 7 genes do cromossoma 19 e os últimos 8 do cromossoma 21, mantendo a identidade genética, na medida em que existe pelo menos um avião de cada tipo posicionado nos Hub's CT1 e CT3.

Tendo em conta a sua nova composição genética, conclui-se ainda que passou o teste da admissibilidade, na medida em que não sofreu qualquer tipo de mutação em nenhum gene.

Em termos de função aptidão, a solução tem resultados semelhantes aos seus progenitores, tendo no entanto pior desempenho que ambos em termos de produtividade da frota.

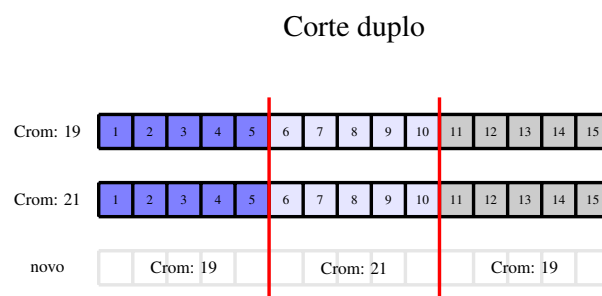
A tabela 4.10 resume a nova população gerada através do operador de cruzamento na primeira iteração do cenário 5 (2 Hub's localizados em CT1 e CT3). Apesar de nenhum novo elemento superar os atributos máximos da população anterior, alguns cromossomas representam uma boa evolução face à população anterior.

Tabela 4.10: Nova população gerada na primeira iteração do cenário 5

cromossoma	tempo_voo	n_voos	hits	local	ligação
51	167.50	40	22	1483	168
52	212.00	46	25	2341	110
53	205.50	44	25	1930	64
54	195.00	46	24	1516	90
55	200.00	42	16	1694	126
56	208.50	44	27	1623	210
57	196.00	44	24	2046	364
58	188.50	42	22	1542	88
59	175.50	42	19	1645	42
60	196.00	40	15	1753	108

O **cruzamento duplo**, representado na figura 4.9, efetua uma troca direta entre sequenciamentos de tarefas por tipo de avião, selecionado automaticamente a posição do primeiro corte entre os genes 5 e 6 e o segundo entre os genes 10 e 11. Neste tipo de cruzamento não existe risco de perda de identidade, já que para serem admissíveis, os progenitores já garantem a existência de pelo menos um avião posicionado em cada Hub do cenário em causa. O novo cromossoma será composto por duas parte de um dos progenitores e outra parte do outro progenitor.

Figura 4.9: Exemplo de Cruzamento duplo



### 4.5.3 Mutação

Existem dois momentos em que os indivíduos são sujeitos ao operador de mutação. O primeiro momento pretende corrigir situações de não admissibilidade identificadas nos cromossomas, seja por concentração excessiva de voos no mesmo *slot*, ou proximidade de voos da mesma rota com diferenças horárias inferiores a uma hora. O segundo momento resulta de um processo de escolha aleatório, sendo selecionados 5 novos cromossomas que sofrerão mutações genéticas, com o intuito de introduzir diversidade à população.

## **4.6 Critério de Paragem**

Definiu-se um critério de paragem fixo para cada uma das partições do algoritmo genético. Deste modo, o processo termina ao fim de 100 iterações.

## Capítulo 5

# Aplicação ao caso de estudo

Este capítulo encontra-se dividido em três partes. Na primeira parte serão apresentados os resultados obtidos para a primeira fase do método de resolução. Na segunda parte serão apresentadas as melhores soluções de cada cenário e posteriormente a escolha da melhor solução encontrada. Na terceira parte são apresentadas as conclusões da aplicação do método ao caso de estudo.

### 5.1 Resultados Computacionais

Nesta secção serão apresentados os resultados do processo iterativo em cada uma das 7 partições. Para cada cenário serão apresentadas as cinco melhores soluções da populações iniciais geradas aleatoriamente e da população final, assim como a evolução do algoritmo ao longo das 100 iterações em termos de valor mínimo, mediana e máximo de cada um dos critérios de avaliação das soluções, nomeadamente, potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota.

#### 5.1.1 Cenário 1

Nas tabelas 5.1 e 5.2, encontram-se respetivamente as 5 melhores soluções iniciais e finais em termos de *score* para o cenário 1 (1 Hub, localizado em CT1).

Tabela 5.1: Melhores soluções da população Inicial para o cenário 1

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
22	3722	78	4.48	0.91
38	3429	81	4.40	0.82
20	3725	56	4.48	0.75
37	2927	78	4.49	0.68
39	3082	75	4.34	0.66

Tabela 5.2: Melhores soluções da população Final para o cenário 1

Cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
1026	5208	120	4.62	0.92
879	5486	106	4.42	0.84
892	5486	106	4.42	0.84
905	5486	106	4.42	0.84
1048	5486	106	4.42	0.84

O desempenho do algoritmo genético neste cenário foi bastante positivo em termos de potencial de passageiros, tendo-se verificado um incremento de 40% em relação à melhor solução da população inicial. No que respeita à conectividade de rede, verificou-se uma melhoria de 54%, enquanto a produtividade da frota aumentou uns ligeiros 3%.

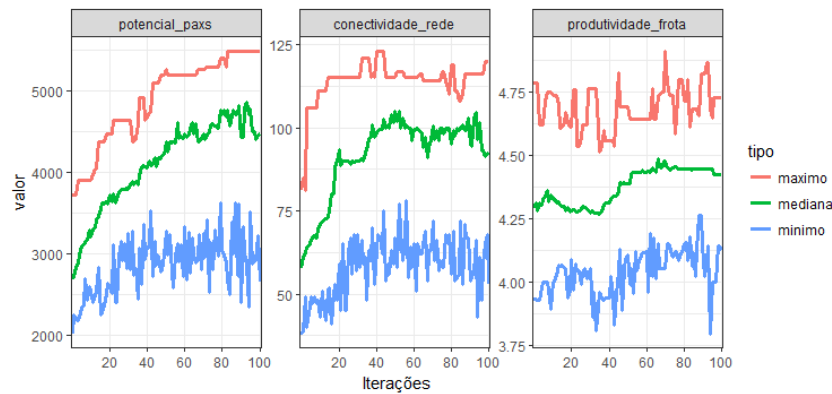


Figura 5.1: Evolução do Algoritmo Genético para o cenário 1 ao longo das 100 iterações

Na figura 5.1, observa-se a evolução do algoritmo genético em termos do potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota para o cenário 1, ao longo das 100 iterações.

Em termos de potencial de passageiros, verificou-se uma evolução gradual da população, tendo existido uma estagnação do valor máximo muito próximo do final do processo.

### 5.1.2 Cenário 2

Nas tabelas 5.3 e 5.4, encontram-se respetivamente as 5 melhores soluções iniciais e finais em termos de *score* para o cenário 2 (1 Hub, localizado em CT2).

Tabela 5.3: Melhores soluções da população Inicial para o cenário 2

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
37	2702	67	4.30	0.93
41	2527	69	4.18	0.84
9	2489	69	4.03	0.78
35	2435	65	3.88	0.68
36	2329	54	4.15	0.66

Tabela 5.4: Melhores soluções da população Final para o cenário 2

Cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
1039	4076	107	3.77	0.82
1048	4076	107	3.77	0.82
1013	4118	97	3.83	0.80
881	4100	97	3.83	0.80
1027	4070	92	3.91	0.79

Apesar de apresentar resultados mais baixos que a melhor solução do cenário 1, o desempenho do algoritmo genético também foi bastante positivo em termos de potencial de passageiros, onde se verificou um incremento de 51% em relação à melhor solução da população inicial. No que respeita à conectividade de rede, verificou-se uma melhoria de 60%, no entanto, a produtividade da frota diminuiu face à melhor solução gerada na população inicial em -12%.

Na figura 5.2, observa-se a evolução do algoritmo genético em termos do potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota para o cenário 2, ao longo das 100 iterações.

De destacar a relação inversa nos resultados de conectividade e produtividade de frota. Ao longo das iterações, a evolução positiva da mediana da população em termos de conectividade, é acompanhada por um decréscimo da mediana referente à produtividade de frota.



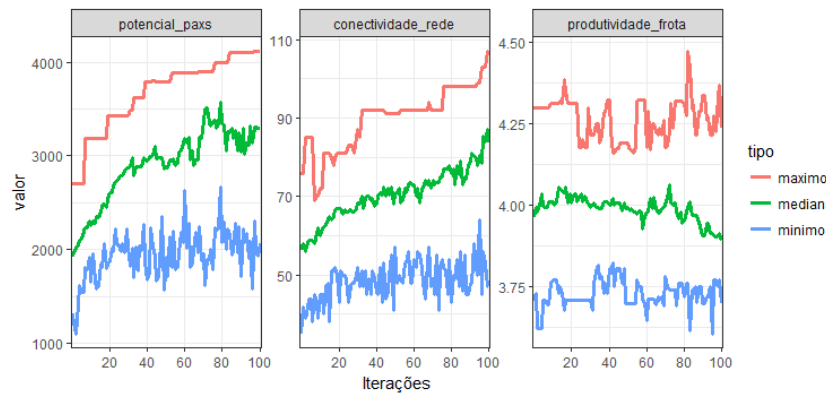


Figura 5.2: Evolução do Algoritmo Genético para o cenário 2 ao longo das 100 iterações

### 5.1.3 Cenário 3

Nas tabelas 5.5 e 5.6, encontram-se respetivamente as 5 melhores soluções iniciais e finais em termos de *score* para o cenário 3 (1 Hub, localizado em CT3).

Tabela 5.5: Melhores soluções da população Inicial para o cenário 3

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
2	3523	91	4.17	0.83
4	3615	64	4.28	0.73
22	3075	90	4.16	0.72
33	3386	86	3.97	0.70
12	2796	94	4.00	0.62

Tabela 5.6: Melhores soluções da população Final para o cenário 3

Cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
960	5846	119	4.05	0.80
1036	5708	111	4.13	0.78
1019	6019	99	4.12	0.77
1030	5417	117	4.11	0.75
1018	6183	98	4.05	0.75

O desempenho do algoritmo genético no cenário 3 foi bastante positivo em termos de potencial de passageiros. Verificou-se um significativo aumento de 66% em relação à melhor solução da população inicial. No que respeita à conectividade de rede, verificou-se uma melhoria de 31%, no entanto, tal como verificado nos resultados do cenário 2, a produtividade da frota também diminuiu face à melhor solução gerada na população inicial em -3%.

Na figura 5.3, observa-se a evolução do algoritmo genético em termos do potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota para o cenário 3, ao longo das 100 iterações.

Tal como observado nos cenários anteriores, a evolução da população ao longo das iterações no que respeita à produtividade de frota apresenta uma relação inversa com a conectividade de rede.

### 5.1.4 Cenário 4

Nas tabelas 5.7 e 5.8, encontram-se respetivamente as 5 melhores soluções iniciais e finais em termos de *score* para o cenário 4 (2 Hub's, localizados em CT1 e CT2).

Comparando os resultados finais obtidos para este cenário de 2 Hub's localizados em CT1 e CT2 com a opção de apenas um Hub em CT1 (cenário 1), ou apenas um Hub em CT2 (cenário 2), conclui-se que a melhor solução do cenário 4 é uma solução dominada, na medida em que apresenta -35% de potencial de passageiros, -31% de conectividade de rede e -1% de produtividade da frota em comparação com o

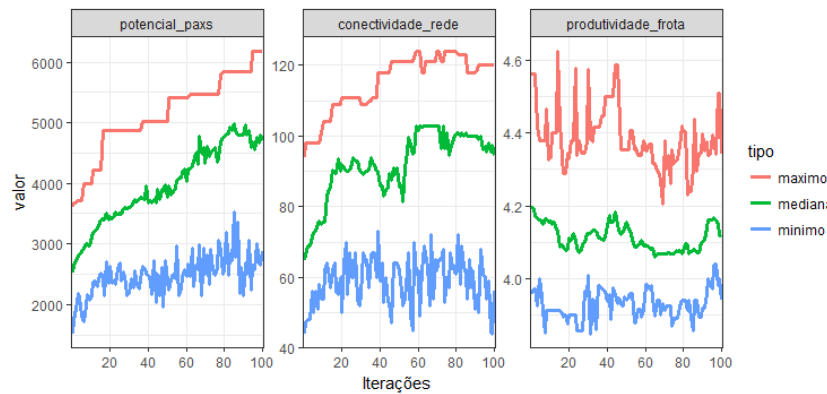


Figura 5.3: Evolução do Algoritmo Genético para o cenário 3 ao longo das 100 iterações

Tabela 5.7: Melhores soluções da população Inicial para o cenário 4

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
34	2361	33	4.35	0.84
8	2198	34	4.56	0.84
14	2442	28	4.31	0.81
48	2063	39	4.36	0.78
24	2297	29	4.38	0.78

Tabela 5.8: Melhores soluções da população Final para o cenário 4

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
825	3401	83	4.57	0.98
850	3401	83	4.57	0.98
882	3401	83	4.57	0.98
925	3401	83	4.57	0.98
934	3401	83	4.57	0.98

cenário 1.

Apesar da pior performance em comparação com outras soluções, o desempenho do algoritmo genético no cenário 4 foi bastante positivo em termos de potencial de passageiros. Observou-se um aumento de 44% em relação à melhor solução da população inicial. No que respeita à conectividade de rede, verificou-se um incremento muito substancial de conectividade em 152%. A produtividade da frota aumentou 5% em comparação com a melhor solução inicial.

Na figura 5.4, observa-se a evolução do algoritmo genético em termos do potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota para o cenário 4, ao longo das 100 iterações.

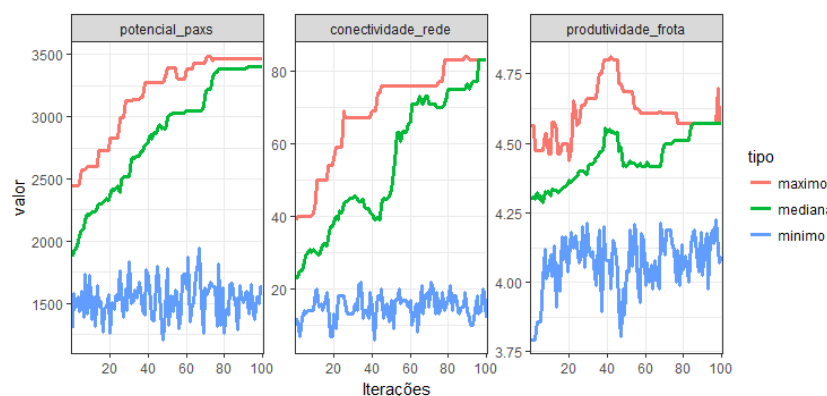


Figura 5.4: Evolução do Algoritmo Genético para o cenário 4 ao longo das 100 iterações

Através da análise de evolução do algoritmo ao longo das 100 iterações, verificou-se uma grande proximidade entre a mediana da população e o máximo nas três medidas de desempenho. Desta forma, somos levados a concluir que o algoritmo pode ter convergido para um ótimo local.

### 5.1.5 Cenário 5

Nas tabelas 5.9 e 5.10, encontram-se respectivamente as 5 melhores soluções iniciais e finais em termos de *score* para o cenário 5 (2 Hub's, localizados em CT1 e CT3).

Tabela 5.9: Melhores soluções da população Inicial para o cenário 5

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
1	2794	40	4.16	0.80
22	2528	27	4.81	0.75
27	2375	22	4.83	0.65
14	2491	24	4.55	0.64
8	2373	22	4.75	0.63

Tabela 5.10: Melhores soluções da população Final para o cenário 5

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
756	4838	66	4.31	0.82
828	4838	66	4.31	0.82
836	4838	66	4.31	0.82
861	4838	66	4.31	0.82
881	4838	66	4.31	0.82

Comparando os resultados finais obtidos para este cenário de 2 Hub's localizados em CT1 e CT3 com a opção de apenas um Hub em CT1 (cenário 1), ou apenas um Hub em CT3 (cenário 3). Conclui-se que esta é também uma solução dominada pelas opções de um Hub, na medida em que a melhor solução apresenta -17% que o potencial de passageiros do cenário 3, -45% em termos de conectividade de rede e -7% de produtividade da frota em comparação com o cenário 1.

O desempenho do algoritmo genético no cenário 5 foi bastante positivo. Em termos de potencial de passageiros observou-se um aumento de 73% em relação à melhor solução da população inicial. No que respeita à conectividade de rede, verificou-se um aumento de conectividade da rede na ordem dos 65%, enquanto a produtividade da frota aumentou 4% em comparação com a melhor solução inicial.

Ao avaliar os 5 primeiros elementos da população final, verifica-se que os cromossomas apresentam os mesmos resultados, podendo significar baixo nível de diversificação dos cromossomas que compõem a população final.

Na figura 5.5, observa-se a evolução do algoritmo genético em termos do potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota para o cenário 5, ao longo das 100 iterações.

Apesar de não ser tão evidente em termos de análise gráfica, a mediana da população encontra-se próxima do máximo da população, evidenciando um menor grau de pesquisa do espaço de soluções e convergência para um ótimo local.

### 5.1.6 Cenário 6

Nas tabelas 5.11 e 5.12, encontram-se respectivamente as 5 melhores soluções iniciais e finais em termos de *score* para o cenário 6 (2 Hub's, localizados em CT2 e CT3).

Comparando os resultados finais obtidos para este cenário de 2 Hub's localizados em CT2 e CT3 com a opção de apenas um Hub em CT2 (cenário 2), ou apenas um Hub em CT3 (cenário 3). Observa-se um pior desempenho em termos de potencial de passageiros e conectividade de rede, mais concretamente, -30% em termos de potencial de passageiros e -48% de conectividade de rede, no entanto, esta solução apresenta melhores resultados em termos de produtividade da frota que qualquer uma dos cenários de 1

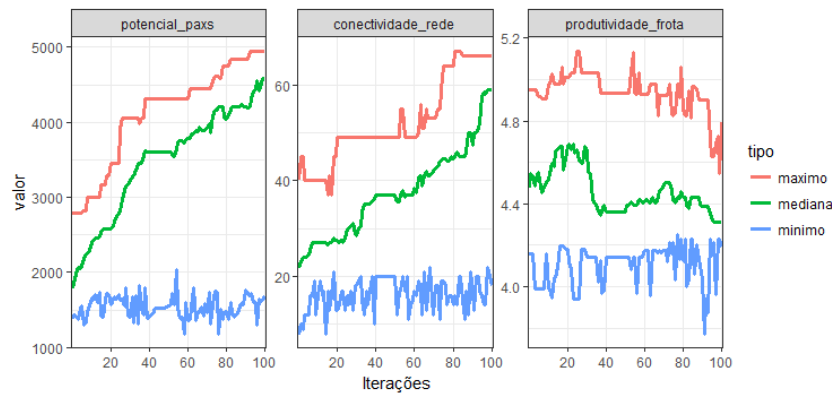


Figura 5.5: Evolução do Algoritmo Genético para o cenário 5 ao longo das 100 iterações

Tabela 5.11: Melhores soluções da população Inicial para o cenário 6

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
33	2445	29	4.36	0.81
45	2151	28	4.35	0.69
50	2102	33	4.17	0.68
23	2073	32	4.24	0.68
48	2022	30	4.39	0.67

Tabela 5.12: Melhores soluções da população Final para o cenário 6

Cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
601	4092	62	4.13	0.80
762	4092	62	4.13	0.80
778	4092	62	4.13	0.80
867	4092	62	4.13	0.80
884	4092	62	4.13	0.80

Hub comparados (cenários 2 e 3). A produtividade da frota é superior à do cenário 2 em 10% e superior ao cenário 3 em 2%.

Verificou-se um bom desempenho do algoritmo genético aplicado ao cenário 6. Em termos de potencial de passageiros foi obtida uma solução final 67% melhor em comparação com a solução inicial, 114% superior em termos de conectividade de rede. Para este cenário observou-se um decréscimo de produtividade da frota na ordem dos -6%.

Na figura 5.6, observa-se a evolução do algoritmo genético em termos do potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota para o cenário 6, ao longo das 100 iterações.

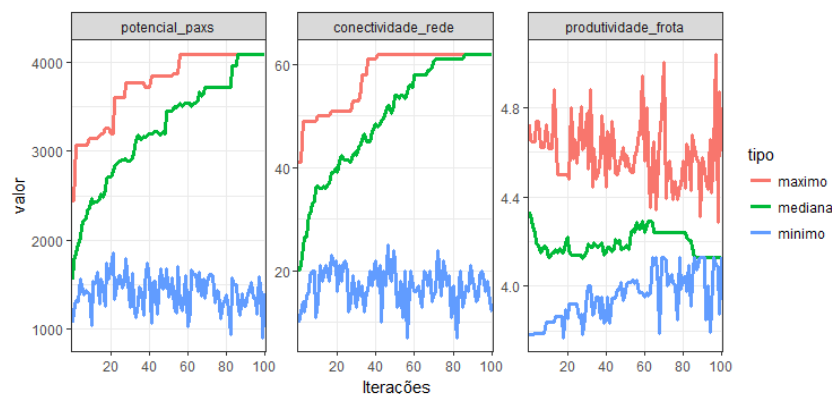


Figura 5.6: Evolução do Algoritmo Genético para o cenário 6 ao longo das 100 iterações

Neste caso existe uma forte evidência que a solução convergiu para um ótimo local, seja pela observação dos cinco elementos da população inicial, que apresentam valores de aptidão iguais, ou pela análise de evolução do algoritmo ao longo do processo iterativo. Verifica-se uma estagnação da aptidão máxima desde as iterações 40 no caso da conectividade de rede, ou 60 no caso do potencial de passageiros. No que respeita à produtividade da frota, a mediana da população converge para o mínimo da população.

### 5.1.7 Cenário 7

Nas tabelas 5.13 e 5.14, encontram-se respetivamente as 5 melhores soluções iniciais e finais em termos de *score* para o cenário 7 (3 Hub's, localizados em CT1, CT2 e CT3).

Tabela 5.13: Melhores soluções da população Inicial para o cenário 7

cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
48	2358	18	4.51	0.87
37	1983	16	4.77	0.76
17	2157	16	4.49	0.74
39	2065	11	4.84	0.72
13	1877	17	4.70	0.71

Tabela 5.14: Melhores soluções da população Final para o cenário 7

Cromossoma	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
965	3832	33	4.55	0.85
931	3913	29	4.62	0.84
985	3913	29	4.62	0.84
989	3913	29	4.62	0.84
997	3913	29	4.62	0.84

Comparando os resultados finais obtidos para este cenário de 3 Hub's localizados com todos os outros cenários, conclui-se que é uma solução dominada.

Relativamente ao desempenho do algoritmo genético aplicado ao cenário 7, o resultado do potencial de passageiros obtido na solução final em comparação com a melhor solução inicial aumentou 63%, enquanto a conectividade de rede teve uma performance positiva com um incremento de 83%, face à melhor solução inicial. Relativamente à produtividade da frota, verificou-se um ligeiro crescimento de apenas 1%.

Na figura 5.7, observa-se a evolução do algoritmo genético em termos do potencial de passageiros, conectividade de rede e produtividade da frota para o cenário 7, ao longo das 100 iterações.

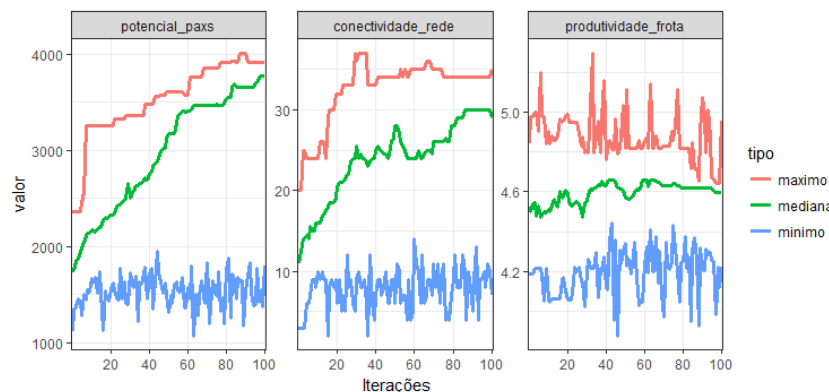


Figura 5.7: Evolução do Algoritmo Genético para o cenário 7 ao longo das 100 iterações

Também neste cenário existem evidências que a solução tenha convergido para um ótimo local.

## 5.2 Escolha da melhor Solução

A tabela 5.15, apresenta a melhor solução de cada cenário e o respetivo *score* calculado entre elas.

Tabela 5.15: Melhor solução de cada cenário

Cenário	Potencial Passageiros	Conectividade Rede	Produtividade Frota	Score
1	5208	120	4.62	0.87
3	5846	119	4.05	0.86
5	4838	66	4.31	0.53
2	4076	107	3.77	0.39
4	3401	83	4.57	0.36
6	4092	62	4.13	0.33
7	3832	33	4.55	0.27

As soluções dos cenários 1 e 3 são muito semelhantes entre si, apresentando resultados muito superiores às restantes. A solução do cenário 1 tem a vantagem de ser 14% superior à solução do cenário 3 em termos de produtividade de Frota, enquanto a solução 3 apresenta melhores resultados em termos de potencial de passageiros, sendo 12% superior à solução do cenário 1.

Apesar da solução do cenário 3 apresentar melhores resultados em termos de passageiros potenciais, considera-se que a solução do cenário 1 apresenta valores mais equilibrados em termos de potencial de procura, conectividade de rede e produtividade da frota, sendo escolhida como solução final.

Na tabela 5.16, encontra-se representado o cromossoma escolhido como melhor solução do caso de estudo.

Tabela 5.16: Melhor cromossoma cenário 1 (1 HUB's em CT1)

grupo	posição	percurso	tempo_voo	n_voos	hits	local	ligação
1	CT1	551-1713	14.00	2	8	296	169
1	CT1	196-1278	15.50	2	2	143	69
1	CT1	657-1781	21.00	2	2	341	88
1	CT1	650-1774	21.00	2	6	399	91
1	CT1	645-1769	21.00	2	10	402	294
2	CT1	266-1411	10.00	2	3	155	83
2	CT1	352-1476	11.50	2	8	113	36
2	CT1	295-1366	10.00	2	8	99	32
2	CT1	855-1965-395-1488	19.00	4	7	187	195
2	CT1	412-1575-828-1864	17.50	4	13	206	77
3	CT1	100-1147-130-1235	11.00	4	12	256	261
3	CT1	538-1627-137-1244	10.50	4	6	246	125
3	CT1	258-1308-9-1103-84-1192	12.00	6	15	190	229
3	CT1	74-1182-1040-2076	11.00	4	10	109	47
3	CT1	60-1087-1006-2106	7.50	4	10	66	204

Esta solução encontra-se representada na tabela 5.17, traduzindo-se numa cobertura de rede composta por 14 destinos à partida do Hub localizado em CT1. Em termos de densidade de voos para cada destino, 7 são servidos por 1 frequência diária em cada sentido, 5 destinos são servidos por 2 voos diários em cada sentido e 2 destinos por 3 voos diários em cada sentido.

## 5.3 Conclusões

A aplicação da metodologia proposta nesta dissertação ao problema de **desenho de redes** teve resultados bastante positivos. Nos 7 cenários avaliados foram encontradas soluções substancialmente melhores que as iniciais em termos de potencial de passageiros e conectividade de rede. No que respeita ao potencial de passageiros, o incremento mínimo ocorreu no cenário 1, mesmo assim, a solução melhorou 40% face à melhor solução inicial. No que respeita à conectividade de rede, o incremento mínimo face à melhor solução inicial aconteceu no cenário 3, tendo-se verificado no entanto uma melhoria de 31%.

Tabela 5.17: Número de voos para cada destino

destino	Número de voos
CT3	3
OE2	3
CT2	2
ES1	2
ES4	2
NR1	2
SL4	2
ES2	1
ES3	1
NR2	1
NR4	1
NR5	1
OE5	1
SL1	1

Tendo em consideração a relação entre a conectividade de rede e a produtividade da frota, em alguns casos observou-se uma ligeira redução da produtividade da frota, no entanto considera-se que foi largamente superado pelo crescimentos observados em termos de potencial de passageiros e conectividade de rede.

Apesar de se terem obtido bons resultados, nos cenários com localizações em mais que um Hub, verificaram-se fortes evidências que as soluções convergiram para ótimos locais.

Considerando a rede apresentada no caso de estudo, a solução que confere maior robustez e equilíbrio para uma companhia aérea com estrutura de rede *Hub-and-Spoke* é a que utiliza apenas 1 Hub localizado em CT1. Dos 22 aeroportos de destino possíveis, a melhor solução sugere oferecer serviços para 14 destinos, materializando-se numa taxa de cobertura de 64%.

Como desenvolvimentos futuros, seria interessante aprofundar as possíveis razões para os cenários com mais do que 1 hub terem convergido para ótimos locais.





## Capítulo 6

# Conclusões

Esta dissertação centrou-se na resolução do problema integral de **desenho de redes** no contexto de uma companhia aérea com estrutura de rede *Hub-and-Spoke*. Recorreu-se à aplicação de um algoritmo genético como suporte à decisão sobre duas questões centrais. A primeira está relacionada com a identificação do número e localização de hub's da solução que apresenta o melhor resultado encontrado, enquanto a segunda diz respeito à construção de uma boa solução de rede em termos do número de passageiros potenciais, conectividade de rede e produtividade da frota.

Para testar o algoritmo genético foi considerado um caso de estudo fictício, tendo sido gerada uma rede constituída por 23 aeroportos, dos quais 3 foram considerados potenciais Hub's e uma frota composta por 15 aviões de 3 tipos diferentes. Definiu-se os tempos de voo em função das distâncias entre os aeroportos. De forma a conferir mais realismo ao problema em análise, foram gerados aleatoriamente os melhores tempos de voo entre os diversos O&D de modo a simular a existência de concorrência. Por fim, gerou-se aleatoriamente o potencial de procura em cada O&D, assim como os respetivos pesos de venda de cada POC.

Partindo dos dados de input referidos anteriormente, em seguida foi proposto um método de modelação da procura em função da preferência horária dos passageiros. Esta modelação teve como objetivo distribuir a procura potencial ao longo do dia, considerando intervalos de 15 minutos e o tempo de atividade dos aeroportos, potencial de procura total em cada O&D e os respetivos pesos de venda em cada POC.

A modelação de procura em termos de preferência horária teve um papel bastante importante, na medida em que permitiu quantificar os diferentes pares de slots admissíveis por intervalos de 15 minutos, servindo posteriormente de base ao algoritmo genético aplicado ao caso de estudo.

Na aplicação do algoritmo genético ao problema de desenho de rede e, considerando a elevada complexidade que o problema confere, o maior desafio foi manter a admissibilidade das soluções durante o processo iterativo e garantir uma pesquisa do espaço de soluções abrangente. A codificação do problema, através das garantias de admissibilidade de sequenciamentos ao nível dos genes e avaliação constante da admissibilidade dos cromossomas, assim como a respetiva correção de soluções não admissíveis, foram críticas para o sucesso do método aplicado. Por outro lado, a criação de 7 cenários particionados, numa primeira fase de resolução, teve um papel importante para garantir uma pesquisa do espaço de soluções abrangente.

Os resultados computacionais demonstraram que o recurso a um algoritmo genético é adequado a este tipo de problemas, na medida em que foram conseguidas soluções finais significativamente melhores que as soluções iniciais.

No que concerne ao caso de estudo, a melhor solução encontrada é constituída por um Hub localizado no aeroporto CT1. A solução considerada mais robusta e equilibrada em termos de potencial de procura, conectividade de rede e produtividade da frota sugere oferecer serviços à partida de CT1 para 14 destinos, o que se materializa numa taxa de cobertura de 64% dos 22 destinos possíveis (não considerando CT1), 7 destinos dos quais operados com 1 serviço diário, 5 por 2 voos por dia e 2 com três voos por dia.

Como desenvolvimentos futuros, seria interessante aprofundar as possíveis razões para os cenários com mais do que 1 hub terem convergido para ótimos locais.

# Bibliografia

- I. A. T. Association et al. Worldwide slot guidelines (7th, 2015).
- B. Baldanza. *Handbook of Airline Economics (2nd edition)*, chapter Measuring Airline Profitability. New York: Aviation Week/Graw-Hill, 2002.
- C. Barnhart, P. Belobaba, and A. R. Odoni. Applications of operations research in the air transport industry. *Transportation science*, 37(4):368–391, 2003.
- M. Bazargan. *Airline operations and scheduling*. Ashgate Publishing, Ltd., 2012.
- P. P. Belobaba. 16.75j/1.234j airline management, february 8, 2006: Introduction to the airline planning process. MIT OpenCourseWare <http://ocw.mit.edu> (Accessed April 6,2016).License: Creative Commons BY-NC-SA, 2006a.
- P. P. Belobaba. 16.75j/1.234j airline management, march 2006: Route planning and evaluation. MIT OpenCourseWare <http://ocw.mit.edu>.License: Creative Commons BY-NC-SA, 2006b.
- P. P. Belobaba. 16.75j/1.234j airline management, april 2006: Airline fleet planning models. MIT OpenCourseWare <http://ocw.mit.edu>.License: Creative Commons BY-NC-SA, 2006c.
- P. P. Belobaba. 16.75j/1.234j airline management, spring 2006: Operating costs and productivity measures. MIT OpenCourseWare <http://ocw.mit.edu>. License: Creative Commons BY-NC-SA, 2006d.
- P. P. Belobaba. 16.75j/1.234j airline management, february 2006: Airline schedule development. MIT OpenCourseWare <http://ocw.mit.edu>.License: Creative Commons BY-NC-SA, 2006e.
- W. Cheng-Lung. Airline operations and delay management. 2010.
- G. N. Cook and J. Goodwin. Airline networks: A comparison of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 17(2), 2008.
- P. Goedecking. *Networks in aviation: strategies and structures*. Springer Science & Business Media, 2010.
- J. H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press, 1975.
- T. L. Jacobs, L. A. Garrow, M. Lohatepanont, F. S. Koppelman, G. M. Coldren, and H. Purnomo. *Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry*, chapter Airline Planning and Schedule Development, pages 35–53. Springer, 2012.
- T. T. K. S. A. K. Kuji Urata, Keiiti Sasaki and H. Lidasan. Application of genetic algorithms to an airline-networks scheduling. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2(1): 221–231, 1997.
- P. J. Lederer and R. S. Nambimadom. Airline network design. *Operations Research*, 46(6):785–804, 1998.

- J. J. Sheehan. *Business and Corporate Aviation Management*. McGraw-Hill Education, 2013.
- C.-L. Wu. Improving airline network robustness and operational reliability by sequential optimisation algorithms. *Networks and Spatial Economics*, 6(3-4):235–251, 2006.
- G. Yu and J. Yang. *Optimization applications in the airline industry*. Springer, 1998.
- G. Yu, M. Argüello, G. Song, S. M. McCowan, and A. White. A new era for crew recovery at continental airlines. *Interfaces*, 33(1):5–22, 2003.

# Lista de Figuras

1.1	Conceitos de aviação: Procura	3
1.2	Conceitos de aviação: Oferta	4
1.3	Tipos de estrutura de rede mais comuns	5
1.4	Outros tipos de estruturas de rede	6
1.5	Estrutura: Modelo de rede Misto	7
1.6	Processo de Planeamento Estratégico	11
2.1	Desvio Geográfico	18
2.2	Caso de estudo	22
3.1	Preferência horária: Maior peso do fluxo inbound	27
3.2	Preferência horária: Maior peso do fluxo outbound	27
3.3	Preferência para hora de chegada	28
3.4	Peso da função de partida e chegada	28
3.5	Penalizar procura em O&D de ligação	29
3.6	Ajuste da procura para O&D não diretos	30
3.7	Adicional de Procura	30
3.8	Previsão para voo de longa duração	32
3.9	Previsão para voo de curta duração	32
4.1	Subproblemas abordados: codificação	35
4.2	Sequenciamento de tarefas	36
4.3	Sequenciamento de tarefas: Esquemas de rotação	37
4.4	Exemplo cromossoma	37
4.5	Cromossoma: estrutura de bank	39
4.6	Processo iterativo do AG	40
4.7	Subproblemas abordados: Função Aptidão	40
4.8	Exemplo de Cruzamento simples	44
4.9	Exemplo de Cruzamento duplo	45
5.1	Cenário 1: Performance do Algoritmo Genético	48
5.2	Cenário 2: Performance do Algoritmo Genético	49
5.3	Cenário 3: Performance do Algoritmo Genético	50
5.4	Cenário 4: Performance do Algoritmo Genético	50
5.5	Cenário 5: Performance do Algoritmo Genético	52
5.6	Cenário 6: Performance do Algoritmo Genético	52
5.7	Cenário 7: Performance do Algoritmo Genético	53



# Lista de Tabelas

2.1	Economias de escala estrutura Hub . . . . .	16
2.2	Aeroportos . . . . .	22
2.3	Matriz de tempos de voo . . . . .	23
2.4	Concorrencia . . . . .	23
2.5	Frota . . . . .	24
2.6	Matriz de Procura . . . . .	24
2.7	Matriz de Peso do POC . . . . .	24
3.1	Gerar Itinerários . . . . .	31
4.1	Tabela de cenários . . . . .	34
4.2	Exemplo Cromossoma . . . . .	38
4.3	Tabela de ponderações . . . . .	41
4.4	Exemplo de População Inicial do cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3) . . . . .	41
4.5	Métodos de atribuição de probabilidades . . . . .	42
4.6	Exemplo de População Inicial do cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3) . . . . .	43
4.7	Cromossoma 19 cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3) . . . . .	43
4.8	Cromossoma 21 cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3) . . . . .	44
4.9	Cromossoma 58 cenário 5 (2 HUB's em CT1 e CT3) . . . . .	44
4.10	Nova população gerada na primeira iteração do cenário 5 . . . . .	45
5.1	Cenário 1: População Inicial . . . . .	47
5.2	Cenário 1: População Final . . . . .	47
5.3	Cenário 2: População Inicial . . . . .	48
5.4	Cenário 2: População Final . . . . .	48
5.5	Cenário 3: População Inicial . . . . .	49
5.6	Cenário 3: População Final . . . . .	49
5.7	Cenário 4: População Inicial . . . . .	50
5.8	Cenário 4: População Final . . . . .	50
5.9	Cenário 5: População Inicial . . . . .	51
5.10	Cenário 5: População Final . . . . .	51
5.11	Cenário 6: População Inicial . . . . .	52
5.12	Cenário 6: População Final . . . . .	52
5.13	Cenário 7: População Inicial . . . . .	53
5.14	Cenário 7: População Final . . . . .	53
5.15	Melhor solução de cada cenário . . . . .	54
5.16	Melhor cromossoma cenário 1 (1 HUB's em CT1) . . . . .	54
5.17	Número de voos para cada destino . . . . .	55





# Glossário

**ASK** Sigla inglesa para Available Seat Kilometer e representa um lugar disponível por cada quilometro percorrido. [8](#)

**Banks** Concentração de voos de chegada ou partida no mesmo slot, para permitir maior conectividade entre voos. [5](#), [10](#), [16](#), [19](#)

**BH** Sigla inglesa para Block-Hours. Mede o tempo de utilização efetivo dos aviões desde o momento entre o fecho da porta do avião na partida, até ao momento que a porta abre na chegada, incluindo o taxi time, que corresponde ao momento entre a aterragem e o gate depois do avião aterrar e o momento entre o gate e a pista antes do avião descolar para o próximo voo. [9](#)

**BST** Código IATA de aeroporto fictício potencial Hub. [29](#)

**Buffer Times** tempo adicional introduzido no planeamento horário por forma a reduzir a probabilidade de irregularidades operacionais. [9](#)

**CASK** representa o custos operacionais por unidade de output, medido em cêntimos por ASK. [8](#)

**catchment area** mede a área de influência dos aeroportos, determinando o número de pessoas que vivem num raio de 100-200km ou que conseguem chegar aos aeroportos no período de 1-2 horas por carro ou comboio. [3](#)

**cobertura** número de aeroportos que são servidos pela companhia aérea. [5](#)

**Codeshare** tipo de serviço semelhante ao Connection mas onde um voo que é operado por uma companhia aérea é vendido através de um número de voo de outra companhia aérea. [4](#)

**CT1** Código IATA de aeroporto fictício potencial Hub. [3](#)

**densidade** número de frequências numa determinada rota servidas pela companhia aérea. [5](#), [6](#)

**direto** tipo de serviço para os passageiros que efetuam o segmento mais longo num itinerário do tipo Multileg. [4](#)

**ES1** Código IATA de aeroporto fictício situado a este dos aeroportos Hub. [3](#)

**Gate** Zona do aeroporto onde é feito o embarque e desembarque de passageiros do avião. [9](#), [16](#)

**HH** Código IATA de companhia aérea fictícia para o qual se considera que se irá aplicar o modelo. [29](#)

**Hit** ligação competitiva e admissível, verifica-se quando os horários de ambos os voos estão planeados de forma a que a diferença horária entre a chegada do primeiro voo e partida do segundo, se encontra entre o MCT e MaxCT. [3](#), [10](#), [12](#), [17](#), [20](#)

**Hub** aeroporto utilizado por uma companhia aérea como ponto de conexão para transferência de passageiros para o destino pretendido, manutenção de aviões e placa giratória de aviões. 5–7, 15–20, 23, 32, 35–37

**IATA** Associação Internacional do Transporte Aereo. 12, 13

**Inbound** sentido do percurso da viagem de regresso. 2, 5, 7, 10, 12, 16, 17, 25, 26

**Itinerário** representa um percurso que uma companhia aérea disponibiliza aos passageiros para ligar um determinado O&D. 3–5, 16, 25, 29

**Itinerários** mais que um itinerário. 10

**Leg** é composto por uma descolagem e uma aterragem de um avião. 3

**LF** Designação inglesa para Load Factor, representa a taxa de ocupação média da rede. Mede a percentagem de lugares disponíveis que foram vendidos durante um determinado período. 8

**Ligação** tipo de serviço composto por dois voos que fazem ligação num dado aeroporto, planeados de forma sequencial. 3–5

**MaxCT** Tempo máximo de ligação, ou em inglês Maximum Connecting Time. Representa o tempo máximo para uma ligação se manter competitiva num determinado O&D, tendo em conta as outras alternativas em mercado. 3, 10, 17, 41

**MCT** Tempo mínimo de ligação ou em inglês Minimum Connecting Time. Representa o tempo mínimo necessário garantido pelo aeroporto para fazer a ligação de passageiros e bagagens entre voos. 3, 10, 17, 41

**Multileg** tipo de operação caracterizada por oferecer vários voos sequenciais através de um único número de voo. 4, 6, 7

**Nonstop** tipo de serviço liga dois aeroportos através de um voo sem paragens intermédias, garantindo o menor tempo de viagem total entre os vários tipos de serviços possíveis. 3–5, 7, 10

**NR1** Código IATA de aeroporto fictício situado a norte dos aeroportos Hub. 4

**Numero de voo** corresponde à combinação entre o código da companhia aérea e um determinado número designado. 3

**O&D** procura entre determinada Origem e Destino, intenção de um passageiro viajar entre dois pontos, independentemente do percurso e companhia aérea escolhidos. 2–5, 7, 10, 12, 13, 15–20, 24–26, 29–32, 36

**OE2** Código IATA de aeroporto fictício situado a oeste dos aeroportos Hub. 3

**Off Blocks** Termo usado para definir a saída do avião do gate. 9

**On Blocks** Termo usado para definir a chegada do avião ao gate. 9

**Outbound** sentido do percurso da viagem de ida. 2, 5, 7, 10, 12, 16, 17, 25, 26

**POC** Ponto de início da viagem, ou em inglês Point of Commencement. 2, 24, 26

**POS** Ponto de Venda do bilhete, ou em inglês Point of Sale. 2

**PPC** Paridade de Poder de Compra, representa o valor de uma moeda, expressa em termos da quantidade de produtos ou serviços que uma unidade de dinheiro pode comprar. [3](#)

**Produtividade de avião** forma como os aviões são utilizados, incorporando a distância percorrida e o número médio de lugares oferecidos. [9](#)

**RASK** Produto entre o LF e o Yield, que representa a receita por unidade de output, medido em cêntimos por ASK. [8](#)

**Rede Aérea** formada pelo conjunto de aeroportos servidos de forma direta pela companhia aérea ou indiretamente através dos seus parceiros ao mercado. [5](#)

**Rota** O agrupamento de voos efetuados entre uma determinada origem e um determinado destino. [3](#)

**RPK** Designação inglesa para Revenue Passenger Kilometer, representa um passageiro transportado por cada quilometro percorrido. [8](#)

**Slot** Permissão de aterragem ou descolagem num determinado intervalo de tempo. [12](#), [16](#), [20](#), [31](#), [32](#)

**tarefas** Uma tarefa corresponde a um voo. [35](#), [37](#), [40](#)

**TAT** Sigla inglesa para Turnaround Time e representa o tempo mínimo necessário para reabastecer, limpar, embarcar e desembarcar passageiros e bagagens. Compreende o tempo em que o avião se encontra on blocks. É definido por tipo de avião, sendo que os aviões de maior porte necessitam de um tempo de TAT superior a aviões de pequeno porte. [9](#), [35](#)

**Taxi Time** corresponde ao momento entre a aterragem e o gate depois do avião aterrar e o momento entre o gate e a pista antes do avião descolar para o próximo voo. [9](#)

**Unileg** o mesmo que Nonstop. [3](#), [4](#)

**UTC** Sigla inglesa para Coordinated Universal Time, representa uma uniformização de horas a nível mundial. [21](#), [25](#), [26](#)

**Utilização de avião** número médio de horas que cada avião está a voar em cada período de 24 horas, ou seja, a produtividade que as companhias aéreas retiram dos aviões. [9](#)

**Voo** é composto por um ou mais legs operados consecutivamente por um avião e número de voo únicos. [3](#), [25](#)

**Yield** representa a tarifa média por passageiro. Mede a valor paga por pelos passageiros por cada quilometro. Tipicamente é apresentada em cêntimos por quilometro e é uma medida útil para avaliar mudanças tarifárias ao longo do tempo. [8](#)